











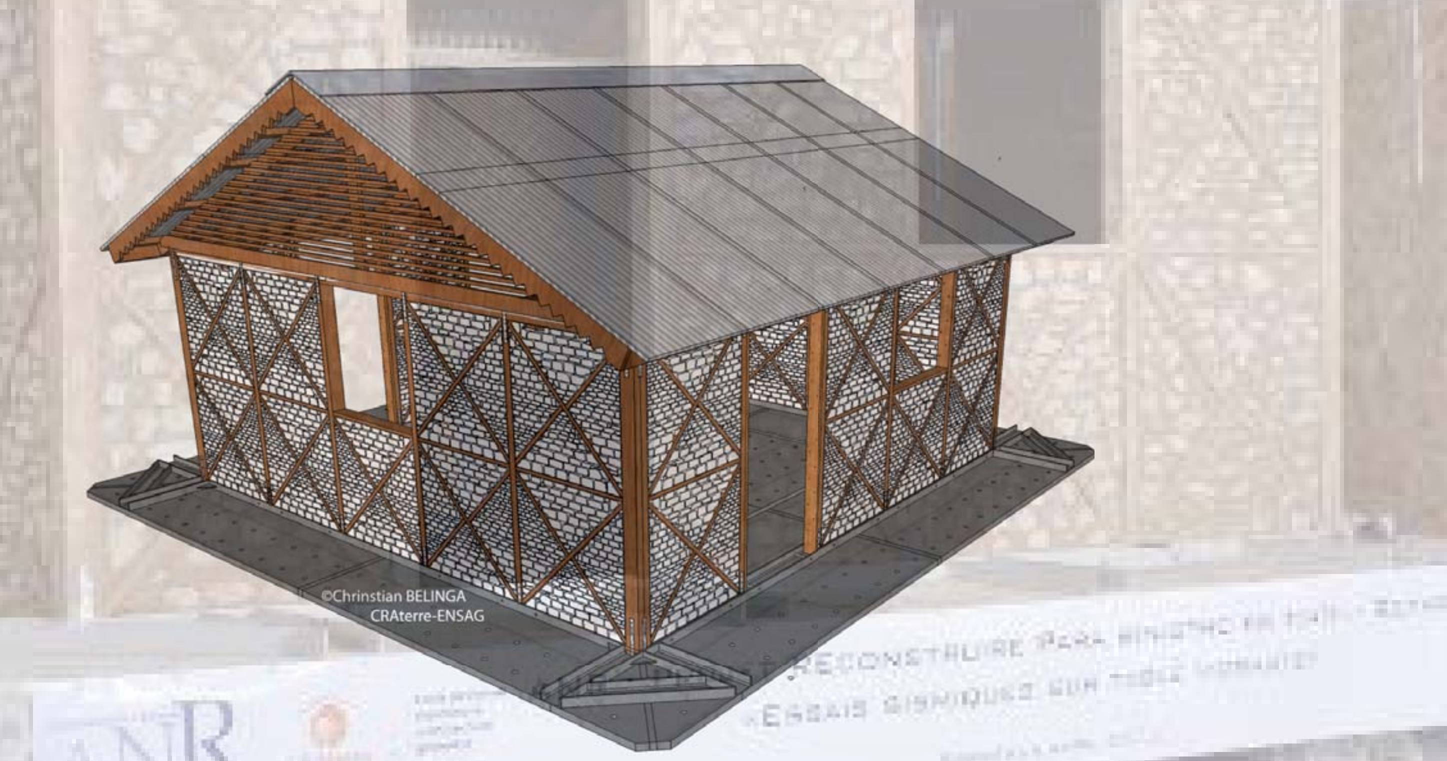








PROJET ReparH
ESSAIS SISMIQUES SUR TABLE VIBRANTE
RAPPORT



Christian BELINGA NKO'O, architecte dplg, DSA-Terre

février 2014

Contributions

Florent VIEUX-CHAMPAGNE
Frédérique JONNARD
Sophie CLAUDE
Noro RAVOAVAHY
Juan TRABANINO
Fabrizio BOGHI
Cécilia DOVERI
Nicolas BEGUIN
Jasim Taher MOHAMMAD
Yannick SIEFFERT
Simon PLA
Majid HAJMIRBABA
Annalisa CAIMI
Olivier MOLES
Philippe GARNIER
Laurent DAUDEVILLE
Stéphane GRANGE
Carole FAYE
Patrice GARCIA
Jean-Charles DUCCINI
Laurent MUNIER
Jessy

Relecture
Léa GENIS

Remerciements

Nous tenons à remercier ici l'Agence Nationale de la Rechercher (ANR) principal financeur du projet «Reconstruire parasinistre en Haïti (ReparH)».

ANR Flash Haïti ReparH
Philippe GARNIER, coordinateur (CRAterre)
Laurent DAUDEVILLE(UJF-3SR)
Hubert GUILLAUD (AE&CC)

ENSAG
Jean Michel KNOP, Directeur
Lucie SCOTET, Dir. adjointe

CRAterre
Marina TRAPPENIERS
Christèle CHAUVIN
Laura DEPIERRE

LABEX AE&CC
Thierry JOFFROY
Zakari BANO

MISEREOR
Barbara KÜPPER
Hans MAIER
Heinz OELLERS
Alexandre DOULINE

Consultants
Wilfredo CARAZAS AEDO
Sophie MARONGIU
Laure CORNET
Elsa CAUDERAY
Javier RODRIGUEZ
Julien HOSTA
Alix HUBERT

PADED

GADRU
Madeleine CASIMIR
Jean Marie LOUIS
Jean CELINES,
Lerismé
et équipe

CONCERT ACTION
Anthony EYMA
Donald DESHOMMES
Jean Fécu LAGUERRE
et équipe

EPPMPH
Soeur Léon ZULMIE
Antonine JUSTE
Junior MICHEL
Tony JEAN CALIXTE
et équipe

PRESTEN
Albert ALEXANDRE
Lukner SAINTE
Désima SAINTE
Jean Fresnel PHENELUS
et équipe

EdM
Florie DEJEANT
Marie-Hermine De MONTANGON
Pierre LEFEVRE
Fils-Aimé THELCINE
Tulio José MATEO De PEÑA
et équipe

PAPDA
Germanie MOLIN
Franck SAINT JEAN
Wilson SANON
et équipe

VEDEK
Pantaléon ROSELINE
Jean Baptiste ANDRELIEN
et équipe





















La campagne des essais sismiques au FCBA à Bordeaux, du 1er au 30 avril 2013, rentre dans le cadre du déroulement du projet «Reconstruire para sinistre en Haïti» : ReparH, financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR).

En effet, suite au tremblement de terre du 12 janvier 2010, CRAterre a coordonné la proposition ReparH en réponse à l'appel Flash Haïti de l'ANR et pilote un partenariat scientifique avec les autres partenaires du projet: le laboratoire 3SR de l'université Joseph Fourrier (UJF) et l'unité de recherche Arechitecture Environnement et Cultures Constructives (AE&CC) de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble (ENSAG). Le but du projet ReparH est d'apporter une assistance scientifique à Haïti dans le contexte de reconstruction. Ce projet associe aussi le Groupe d'Appui au Développement Rural (GADRU), ONG haïtienne, membre de la plate-forme PADED. Le projet ReparH a débuté en juillet 2010 et se terminera en janvier 2015.

En amont de sa candidature à l'appel Flash Haïti de l'ANR, et suite au même tremblement de terre de 2010, CRAterre s'est engagé dans l'accompagnement technique de MISEREOR, ONG allemande œuvrant depuis une quarantaine d'années en Haïti, entre autres, auprès de mouvements paysans travaillant à l'amélioration de leur cadre de vie par le biais de projets agroécologiques (agriculture durable et préservation de l'habitat en tant qu'environnement immédiat).

Pour venir en aide à ses partenaires haïtiens regroupés au sein d'une plate-forme de vingt six organisations locales : Plate-forme d'Agroécologie et de Développement Durable (PADED), dont la demande était de consolider, réparer, reconstruire l'habitat de ses membres en zones rurales ayant souffert du tremblement de terre, MISEREOR a répondu favorablement à un projet de reconstruction de l'habitat rural; soit plus de 4000 maisons évolutives. Projet dont CRAterre a élaboré, en accord avec les partenaires haïtiens, les solutions techniques sur la base des inventaires et des diagnostics faits, après le séisme, sur les modes d'habiter ruraux et les cultures constructives haïtiennes.

Il est ressorti des missions préliminaires et exploratoires que l'habitat traditionnel, comparativement aux constructions nouvelles, avait mieux résisté au tremblement de terre et surtout, qu'il n'avait pas causé des pertes en vies

humaines.

La démarche du projet ReparH s'inscrit donc dans la perspective de l'approche «valorisation des cultures constructives et emploi des matériaux et savoir-faire locaux» entamée par MISEREOR, PADED et CRAterre. Cette démarche consiste à conforter les propositions architecturales qui sont mises en œuvres sur le territoire d'action de quatre organisations paysannes de la PADED à savoir EPPMPH, PRESTEN, CONCERT ACTION et GADRU en leur donnant une validation scientifique et technique.

Ce travail de recherche est consolidé par deux thèses :

- une thèse de doctorat en architecture portant sur l'identification des cultures Para sinistres vernaculaires dans des régions exposées à des aléas naturels, et concernant l'élaboration d'une méthodologie d'analyse des pratiques constructives locales en tant qu'étape de départ pour le renforcement des capacités de résilience dans le domaine de l'habitat, par Annalisa CAIMI (CRAterre-ENSAG, unité de recherche AE&CC).
- une thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur, génie parasismique, pour une modélisation numérique des comportements mécaniques de systèmes composites – bois et remplissage pierres – face à l'aléa sismique, (3SR / UJF) :« Etude expérimentale et numérique parasismique de structure bois remplie de pierres et d'un mortier de terre.», par Florent VIEUX-CHAMPAGNE (3SR/UJF).

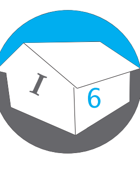
Cette campagne d'essais est donc logique et fait partie intégrante de la recherche en génie para sismique de la thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur encadrée par le laboratoire 3SR (UJF). Elle fait suite à de multiples essais réalisés en France :

– Grenoble(UJF, ENSAG) et Isle d'Abeau (Grands Ateliers de l'ISle d'Abeau),

et en Italie :

- CNR Ivalsa à Trento (San Michele del Adige)

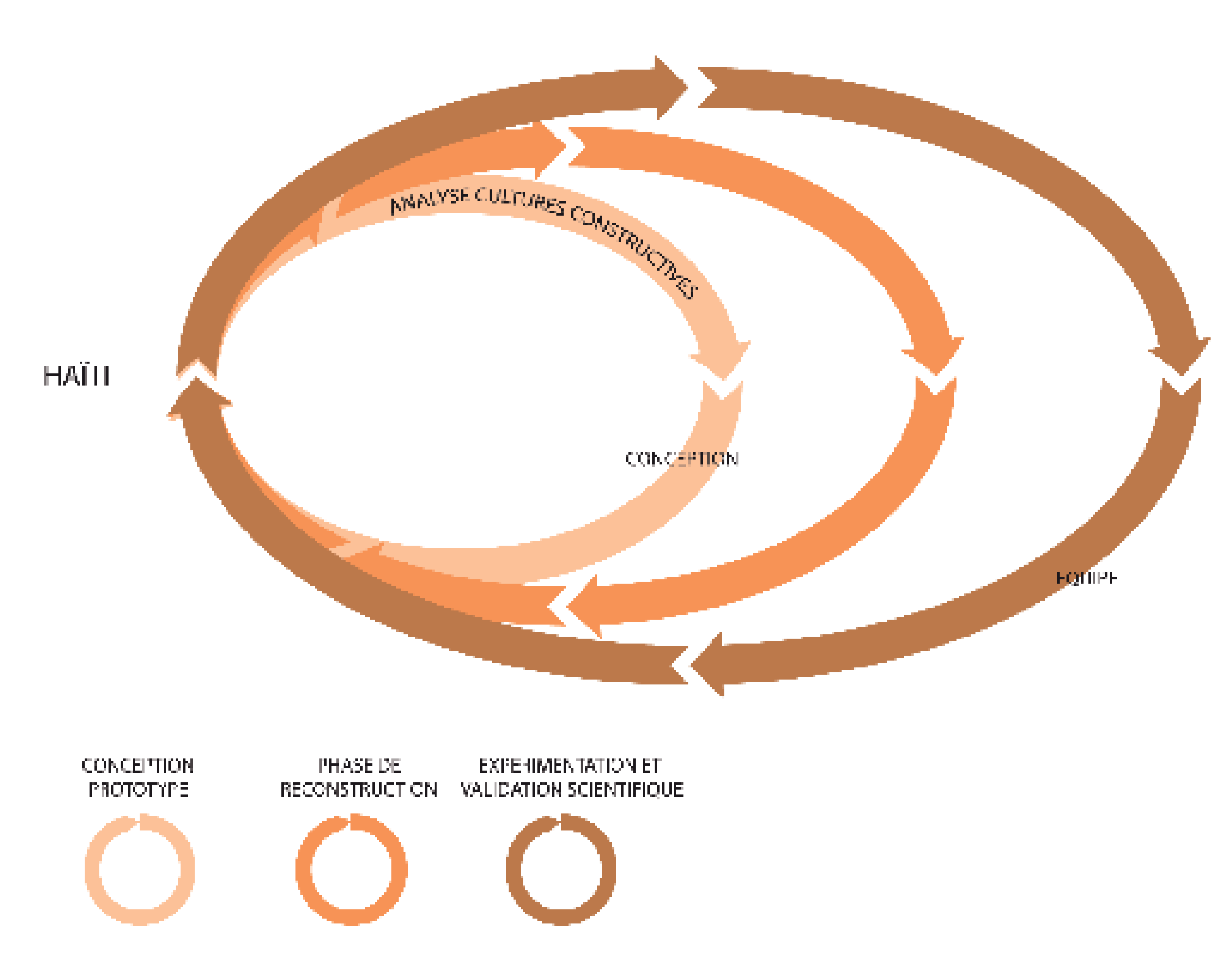
depuis deux ans et vient compléter l'analyse expérimentale multi-échelles : cellules, pans de mur, prototype de maison à l'échelle 1.



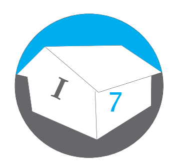
Cetravail de recherche fait écho au travail d'une équipe de consultants pluridisciplinaires; (architectes, ingénieurs, logisticiens, ethnologue,...) qui mettent en œuvrent les phases opérationnelles du projet financé par MISEREOR sur le terrain, à des retours d'expériences d'autres experts de CRAterre ou en liaison avec CRAterre missionnés en Haïti et qui travaillent sur des projets ayant les mêmes bases techniques en zones rurales ou urbaines; exemples du projet CARITAS avec le VEDEK (réparation de maisons) ou le projet d'Entrepreneurs du Monde (pépinière d'entreprises, habitat,...).

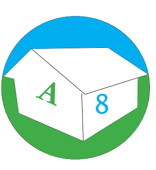
Il en ressort une synergie itérative dans laquelle les observations et résultats de terrain nourrissent la recherche ; laquelle recherche améliore les stratégies opérationnelles, la mise en œuvre des détails techniques de réalisation (ingénierie) ou encore traite les résultats d'enquêtes de terrain pour une meilleure compréhension des cultures constructives (architecture) et de la sociologie du milieu. Cette synergie a pour but de faire évoluer la qualité de l'habitat construit dans cette démarche, d'en renforcer l'appropriation par les organisations locales partenaires et leurs bénéficiaires et de la vulgariser auprès de non bénéficiaires du projet et auprès d'autres bailleurs de la reconstruction de l'Haïti post séisme.

Principe itératif du fonctionnement du projet: amélioration réciproque terrain et recherche.



- Observation et analyse des cultures constructives,
- enquêtes de terrain,
- conception de solutions techniques amélio-rant ou renforçant les cultures constructives,
- discussions avec les partenaires locaux,
- modifications, améliorations si nécessaire,
- implémentation sur le terrain: formation sur chantiers modèles,
- chantiers
- évaluation, adaptation,
- enquêtes de terrain,
- chantiers,
- modélisations,
- essais,
- améliorations corrections,
- chantiers,
- ...





PARTIE A : PRESENTATION DU PROJET

I- PROJET ReparH

1. OBJECTIFS

Le projet ReparH concilie l'approche scientifique des laboratoires associés et l'approche opérationnelle des réalités de terrain. Ce, en vue d'apporter une validation scientifique faisant montre de la pertinence des cultures constructives locales, certes améliorées, mais également l'emploi des matériaux locaux et des savoirs traditionnels associés à leur emploi dans la construction de l'habitat. Les améliorations apportées aux solutions techniques permettent de garantir des constructions plus durables et surtout une meilleure résilience face aux aléas naturels (séismes et cyclones).

Les principaux objectifs :

☐ **Préciser les grandes orientations techniques en se basant sur** :

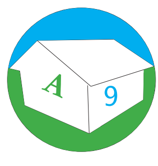
- l'observation des bâtiments sinistrés et de ceux qui ont bien résisté,
- les besoins exprimés par les populations sinistrées et les «bòs» (maçons et charpentiers), qui sont leurs interlocuteurs privilégiés dans le domaine de la construction,
- la qualité des matériaux locaux et leur disponibilité en vue d'une utilisation plus efficiente en complément de matériaux importés ;

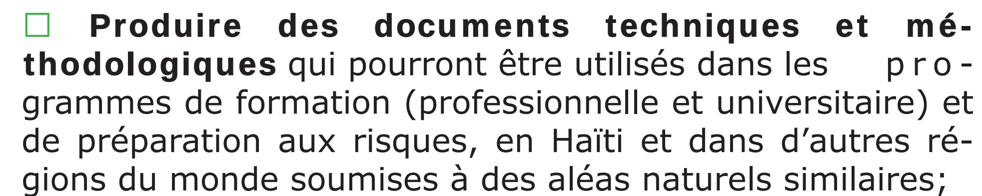
☐ **Proposer des méthodes et stratégies d'intervention adaptées :**

- typologies et dimensions des propositions constructives (unité de base évolutive),
- approches sur le terrain (sélection des bénéficiaires, organisation des familles en kombits - solidarité et entraide mutuelle-,..),
- formation (besoins à court et moyen termes),
- suivi technique,
- suivi administratif et financier ;

☐ **Établir des spécifications techniques pour une sélection de solutions en se basant sur :**

- des simulations du comportement des structures face aux séismes et aux cyclones,
- des réalisations de prototypes grandeur nature (éléments structurel de base),
- des essais sur modèles à différentes échelles y compris à l'échelle 1,
- les retours des expérimentations faites directement sur le terrain ;





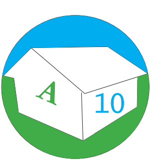
☐ **Produire des documents techniques et méthodologiques** qui pourront être utilisés dans les programmes de formation (professionnelle et universitaire) et de préparation aux risques, en Haïti et dans d'autres régions du monde soumises à des aléas naturels similaires;

☐ **Diffuser et publier les savoirs et expériences** ainsi acquis pour une meilleure vulgarisation de cette ap proche.

II- LA CAMPAGNE DES ESSAIS SISMIQUES

Afin de mettre en place la campagne des essais sismiques d'avril 2013 à Bordeaux, des jalons préalables ont été mis en place depuis le mois d'octobre 2012 ou plus en amont. Il s'agissait :

- des réunions de mise au point à Grenoble et à Bordeaux. Elles ont permis :
  - la définition et l'élaboration du protocole de collaboration entre les différentes équipes (FCBA/3SR/CRAterre),
  - l'harmonisation des calendriers fixant les différentes étapes,
  - la définition des procédures d'essais,
  - la familiarisation avec l'équipement de Bordeaux,
  - ...



- de la planification,

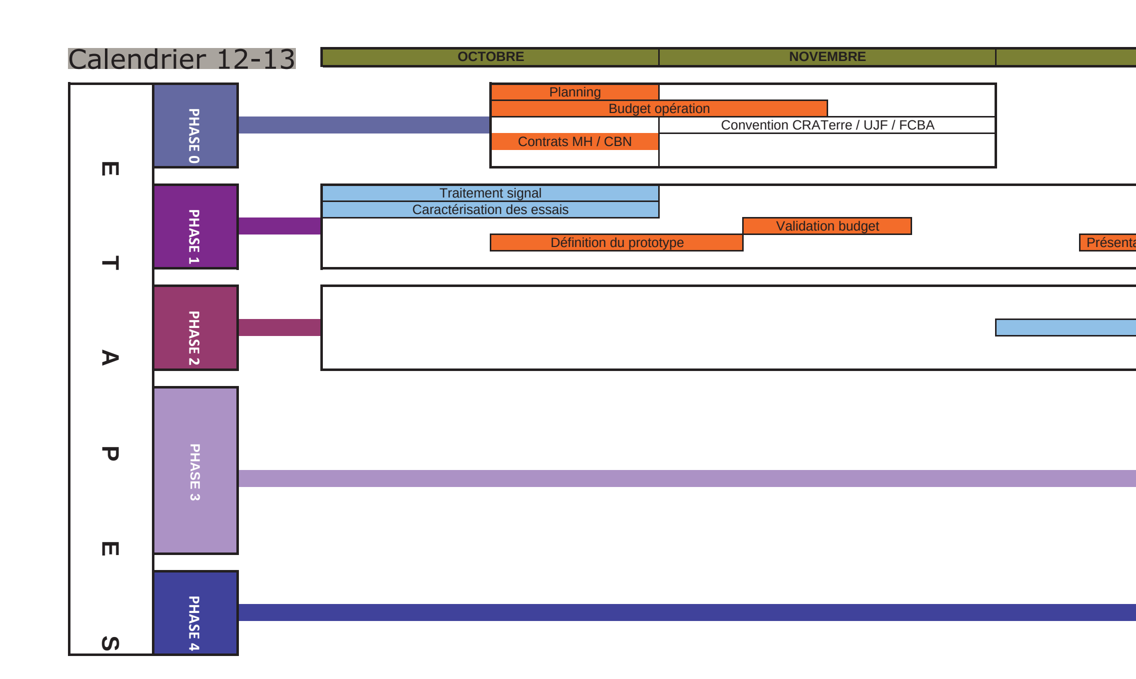
- de la budgétisation :
  - dimensionner le coût de l'ensemble de l'opération en fonction des budgets encore disponibles,

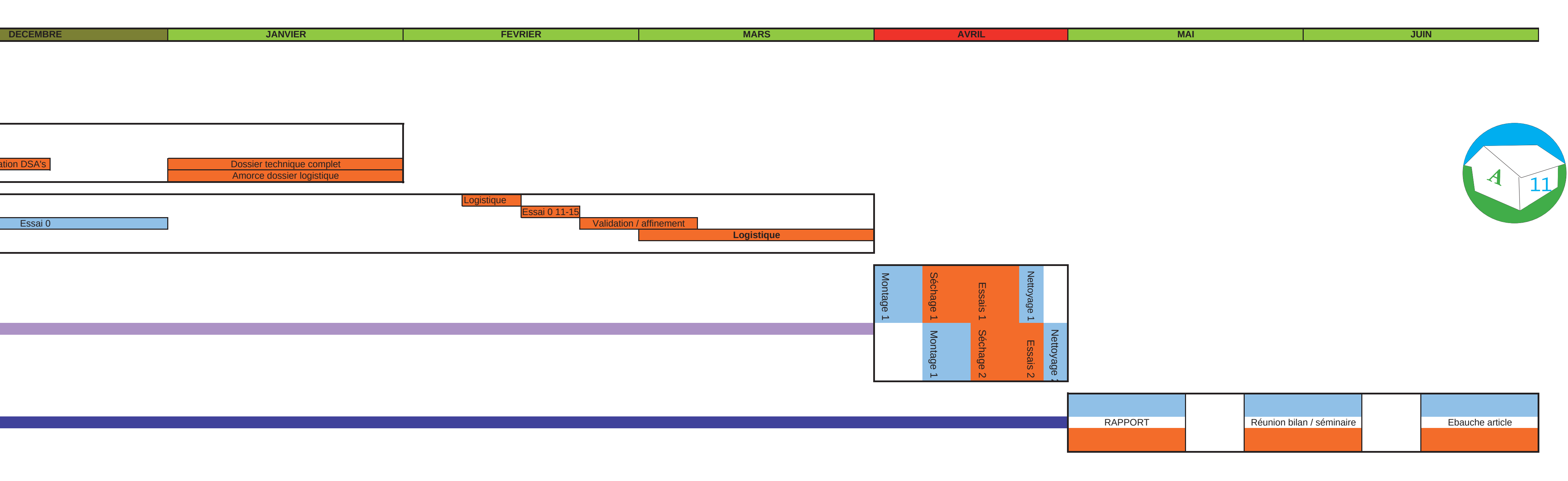
- de la conception du prototype :
  - définir un modèle permettant d'optimiser les objectifs scientifiques et opérationnels du projet,

- des tests sur table vibrante des cellules élémentaires :
  - anticiper des mesures sur les petits éléments testés en statique,
  - anticiper des contraintes liées à l'équipement table vibrante,

- de l'encadrement et de la formation des étudiants à impliquer dans la phase construction :
  - familiariser les étudiants des 2 DSA (Terre et Risques Majeurs) à la technique et aux enjeux du projet,
  - créer une dynamique d'équipe,

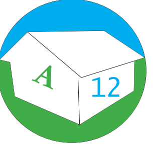
- de la préparation de la logistique du chantier depuis Grenoble pour la période de chantier à Bordeaux.

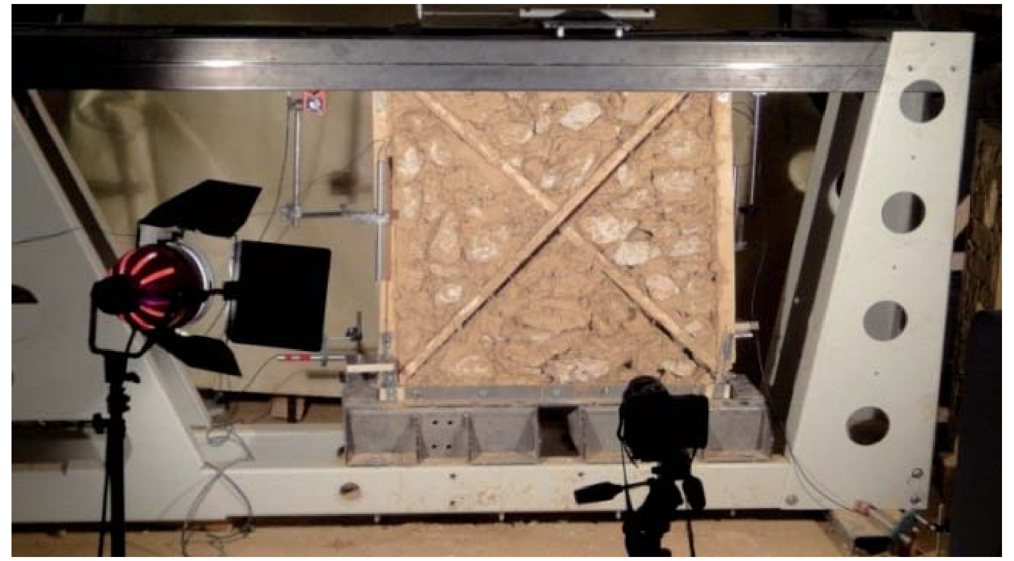


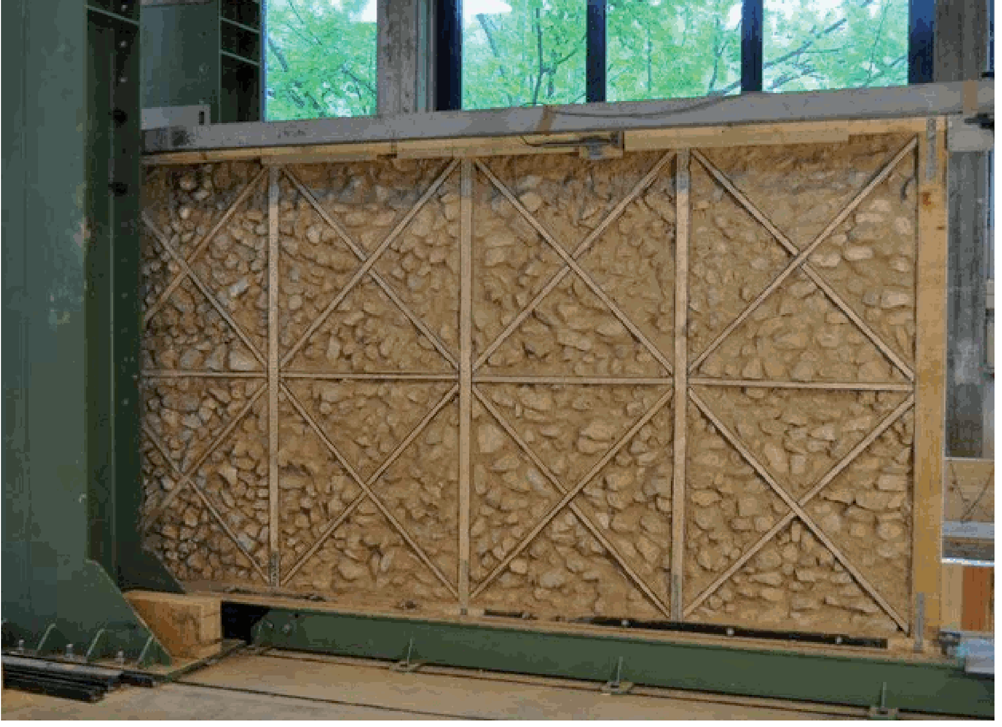

DECEMBRE
JANVIER
FEVRIER
MARS
AVRIL
MAI
JUIN
ation DSA's
Dossier technique complet
Amorce dossier logistique
Logistique
Essai 0 11-15
Essai 0
Validation / affinement
Logistique
Montage 1
Séchage 1
Essais 1
Nettoyage 1
Montage 1
Séchage 2
Essais 2
Nettoyage 2
RAPPORT
Réunion bilan / séminaire
Ebauche article
A
11

1. Justification technique

Ces deux dernières années, de nombreux essais de comportement statique ont eu lieu sur les structures étudiées – ossatures bois et remplissage pierres - grâce au mini mur à réactions dont s'est équipé le laboratoire 3SR. Essais en statique complétés par une campagne de tests sur un mur à réactions dans le laboratoire CNR IVALSA de Trento en Italie. A la suite de ces différentes phases de mesures en statique, une modélisation numérique expérimentale du comportement de la structure a été réalisée. Il restait donc à la comparer à des essais dynamiques en vue d'aboutir à une méthodologie de modélisation de systèmes composites (bois et remplissages divers) pour le dimensionnement para sismique de telles structures. Le cadre théorique de ce travail étant une étude expérimentale et numérique parasismique de structures composites, l'acquisition de données au cours des essais était capitale pour une comparaison des modèles numériques théoriques et des résultats physiques des essais.




Mini mur à réactions


Banc d'essais

2. Choix du prototype

La nature du prototype se devait de reproduire assez fidèlement (forme et réalisation) les modèles d'habitat construits en Haïti. Le travail de recherche en génie parasismique, parmi les nombreux modèles construits, a fait le choix concerté, compte tenu du temps et des moyens disponibles pour la thèse, de se focaliser sur le remplissage en pierres – sujet de la thèse. Le but de la recherche étant de pouvoir aboutir à une méthode capable de modéliser par extrapolation les autres types de remplissage.

Les contraintes majeures de conception du prototype étaient de plusieurs ordres :

a) La taille de la table vibrante

D'une dimension de 6m x 6m, elle ne permettait pas de construire à l'échelle 1 tout un modèle de maison avec galerie ou perron, tout en laissant un espace autour de la construction garantissant la sécurité des travailleurs pendant la mise en œuvre d'une part et la sécurisation du matériel de mesure d'autre part. Seul le noyau central de la maison est donc testé sans la galerie ou le perron.

b) Les capacités de la table vibrante

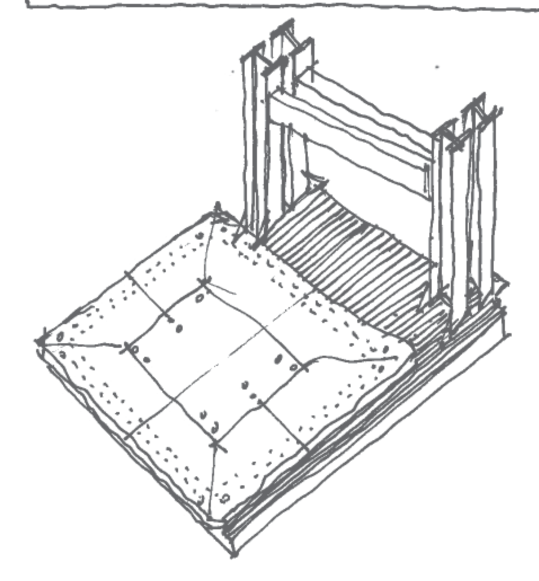
Compte tenu des spécificités du système hydraulique qui pilote la table et du massif contre-poids de la table vibrante, la charge admissible (PTAC) de la table est limitée à environ 12 tonnes de manière à ne pas dépasser des forces équivalentes (masse x accélération) supérieures à 32T ; limite sécuritaire.

c) La préservation de l'intégrité de l'équipement

La plateforme de la table vibrante, quoique en acier, devait être protégée de tout endommagement (chocs, grosses rayures,...) de sa structure, au risque de compromettre les essais à venir, ou de nécessiter de grosses dépenses de surfaçage après les essais sismiques effectués sur notre prototype.

caractéristiques de la table vibrante

TABLE VIBRANTE UNI AXIALE

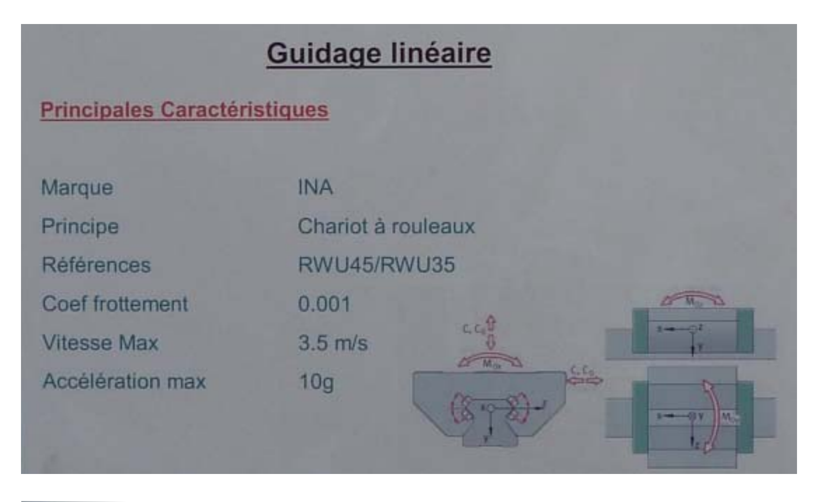


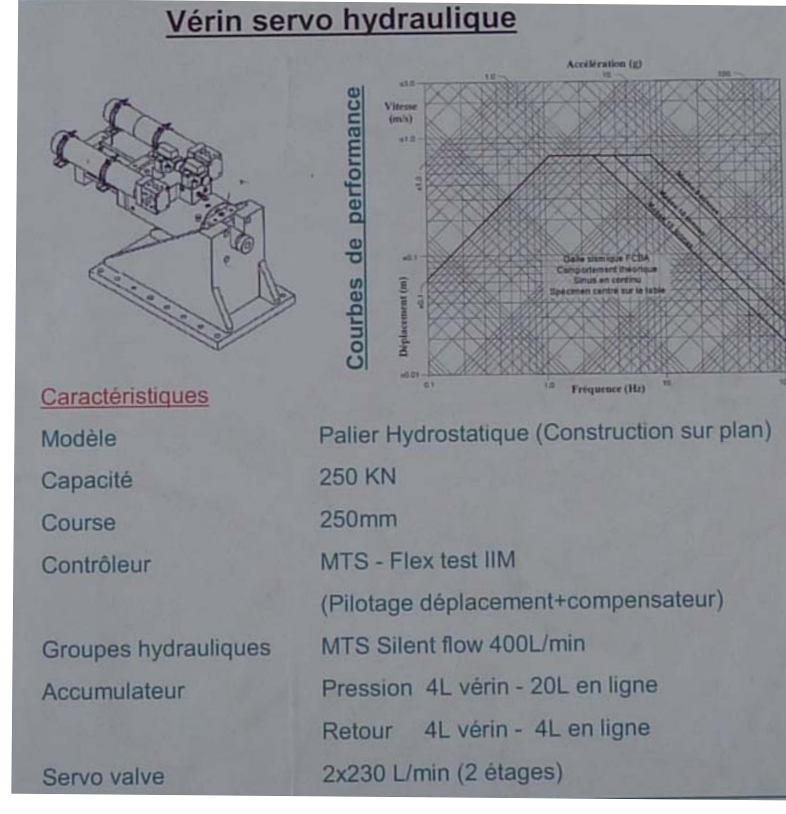
- PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES

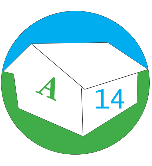
NOYAU CENTRAL :
- DIMENSIONS = 3m x 3m
- MATIÈRE : ALUMINIUM
- POIDS : 2 TONNES

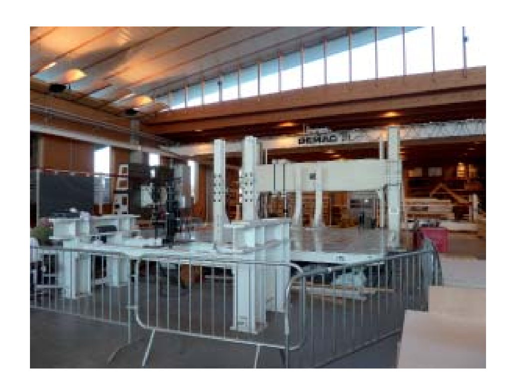
AVEC EXTENSIONS :
- DIM = 6M x 6M
- POIDS = 4 t

DÉPLACEMENT MAX ± 125 mm
VITESSE MAX 0.75 m/s
ACCÉLÉRATION MAX ≃ 8g TABLE NUE SANS EXTENS°
≃ 4g AVEC
GAMME DE FRÉQUENCES JUSQU'À 30 HERTZ
CHARGE UTILE 10 t/m





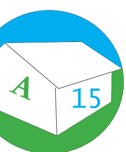




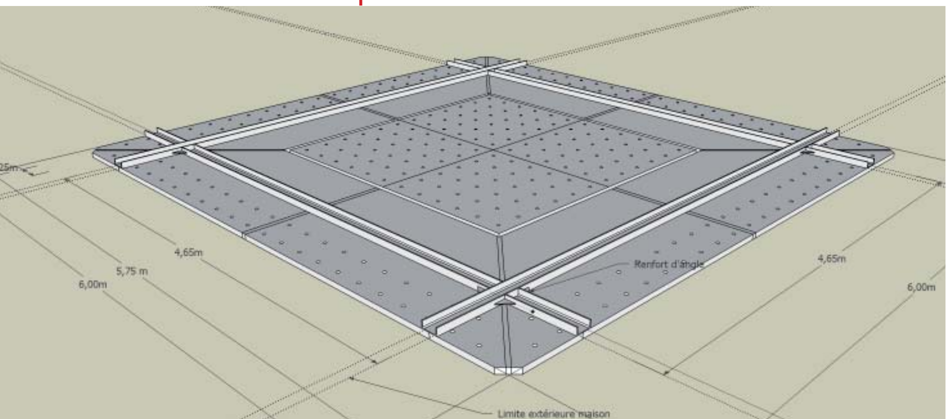


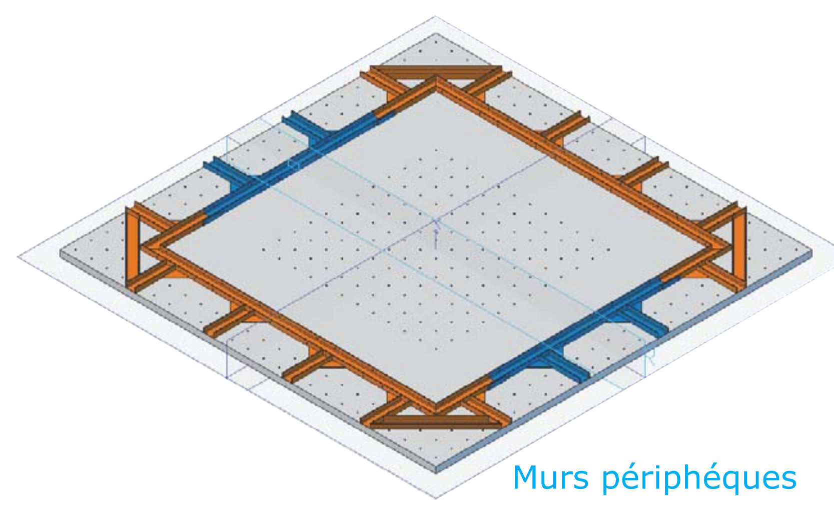
d) La non dissipation de l'énergie ailleurs que dans le prototype

La nature de la table rendait complexe la réalisation du prototype de manière fidèle, notamment à son ancrage sur le terrain à savoir fondations pierres ou blocs de ciment et soubassements en pierres ou en parpaings de ciment. Compte tenu du souci de préservation de l'intégrité de l'équipement d'une part et de la nécessité de concentration des efforts (forces) produits par la table sur la structure à tester d'autre part, les différentes solutions évoquées ne permettaient pas de garantir un ancrage expérimentalement acceptable et sécuritairement confortable du prototype sur la table pendant la durée des essais.
La solution d'un bâti métallique a donc été choisie comme compromis scientifique pour une meilleure acquisition de résultats non perturbés par des évènements extérieurs de type non stabilité du prototype ou encore perturbation de la lecture du déplacement du vérin ou des éléments de structure, par les capteurs à fil, voire production de fréquences indésirables compromettant ou perturbant les autres instruments de mesure.



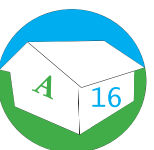
Détails du bati métallique




Murs périphéques

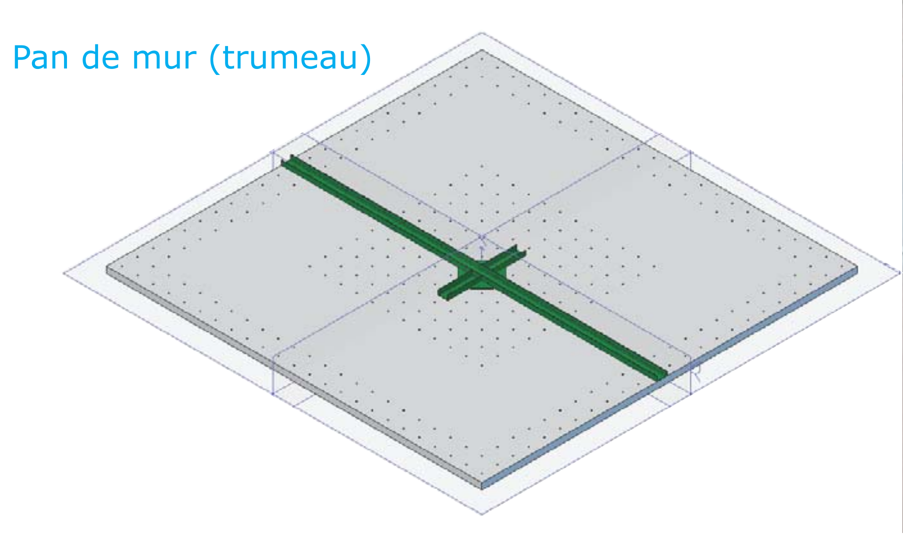


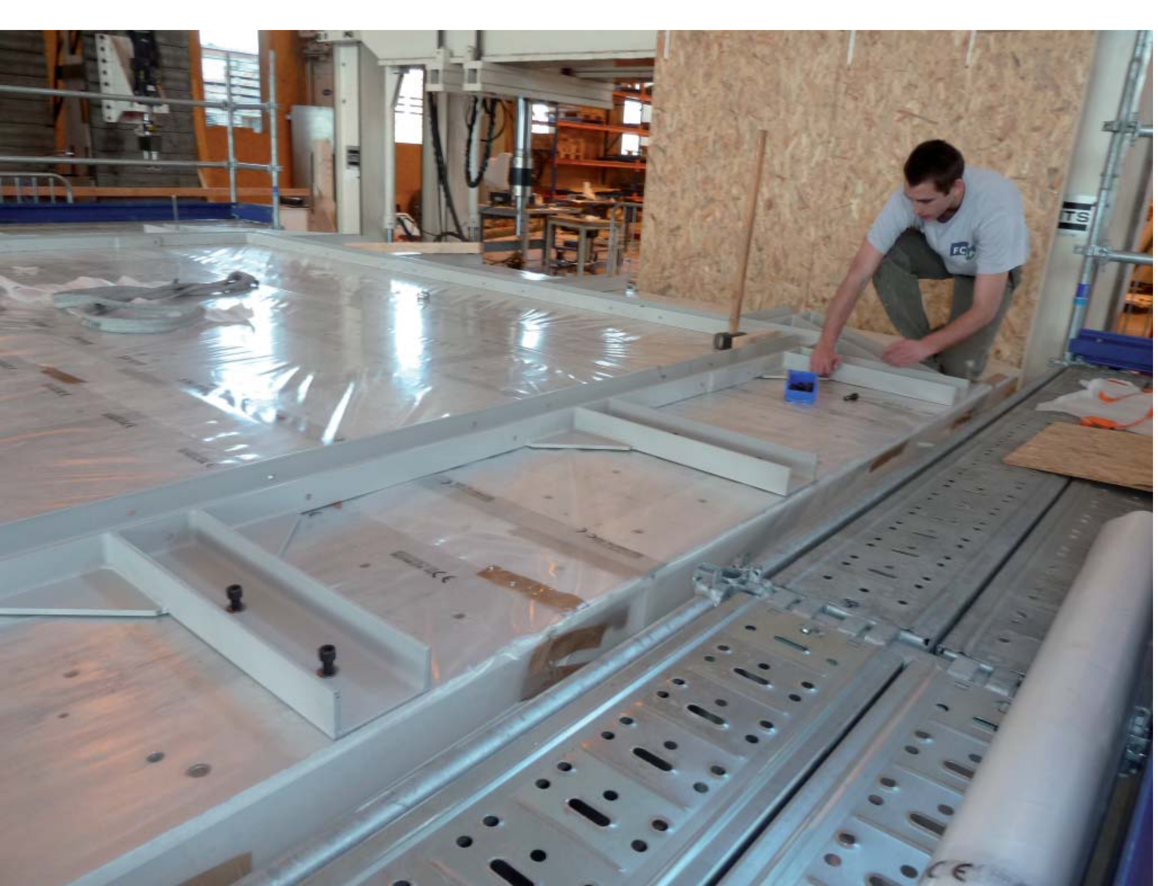




Principe d’ancrage

Pan de mur (trumeau)





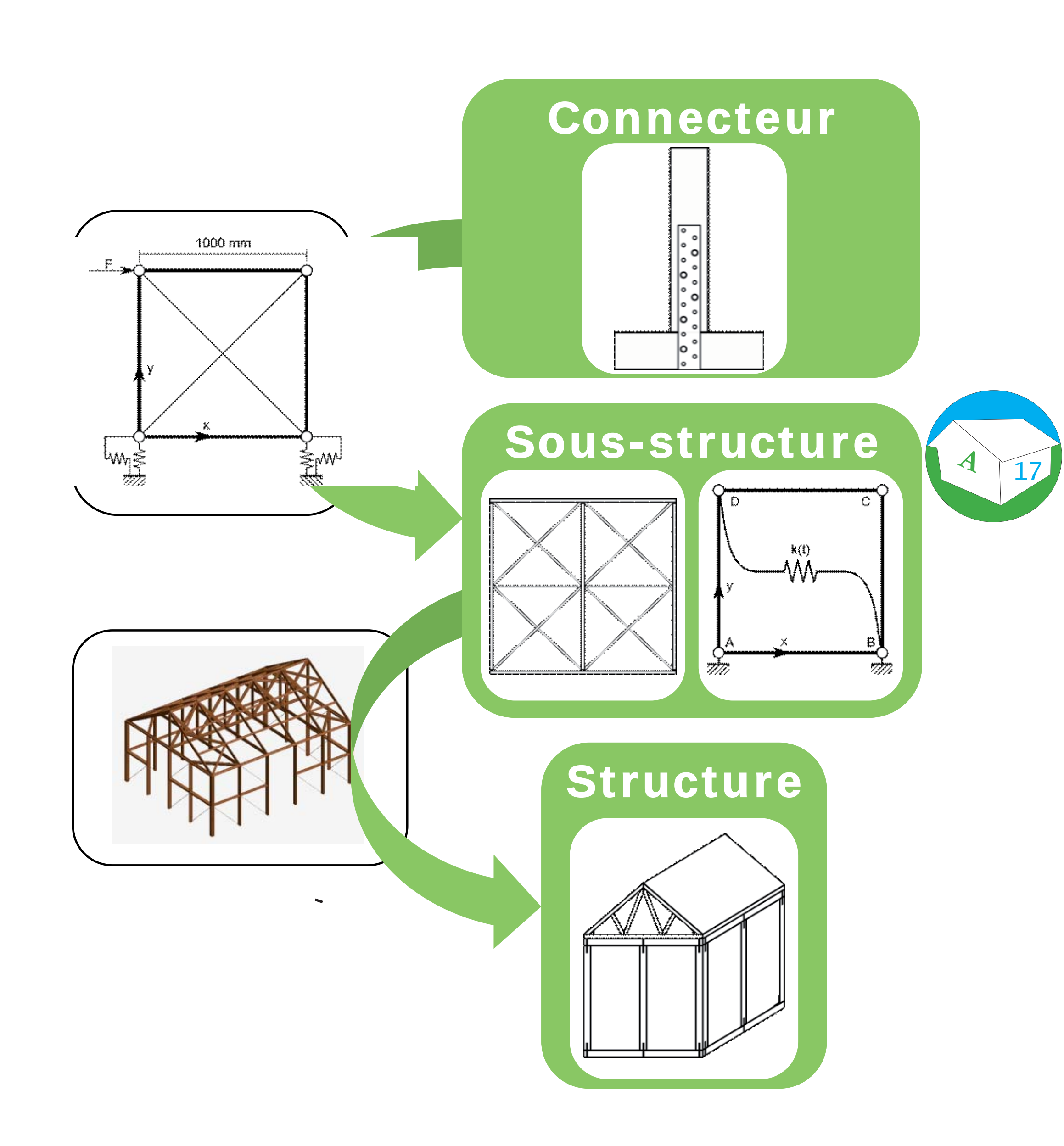
e) La symétrie

Afin de maximiser les mesures et de rendre le cadre théorique des mesures parfait (le moins perturbé possible), les masses sollicitées en déplacement devaient être de la même nature de part et d'autre du modèle.

f) La confrontation à la modélisation numérique multi-échelles

L'évolution du travail de recherche a abouti à la réalisation numérique des différents modes de la maison : comportements de la structure en fonction de sa sollicitation aux efforts. La nature des essais étant d'exciter la maison, de voir et d'analyser comment elle se comporterait par rapport aux sollicitations puis de prouver qu'elle tiendrait à un séisme de même nature que celui du 12 janvier 2010, la démarche scientifique a ajouté comme autre contrainte d'installer le prototype sur la table vibrante sur celui de ses modes les plus fragiles.
Le prototype a donc été installé en fonction de ce mode avec le soin de mettre la triangulation de la charpente perpendiculairement à la direction de poussée-traction du vérin, de manière à être la moins rigidifiante possible pour l'ensemble. En d'autres termes, dans la mesure où les maisons sur le terrain ne seront jamais orientées d'une seule manière, que l'origine des ondes sismiques est dès lors imprévisible, de même que le sens dans lequel les maisons seraient réellement sollicitées, il était important de comprendre comment réagirait la maison dans une telle orientation défavorable.

Modélisation numérique selon une approche multi-échelles



Travaux: Florent Vieux-Champagne

Tests expérimentaux multi-échelles
Assemblages

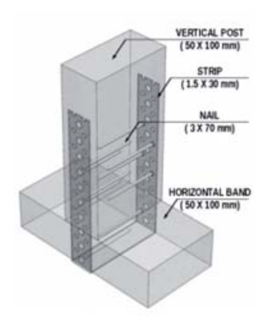


Expérimental

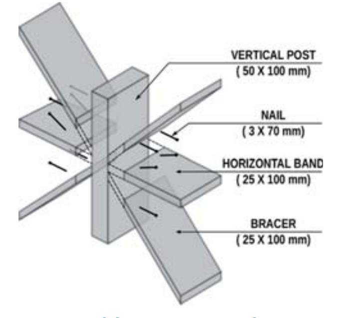


ReparH – Etude parasismique d'une maison haïtienne

A l'échelle de l'assemblage : principe de l'étude





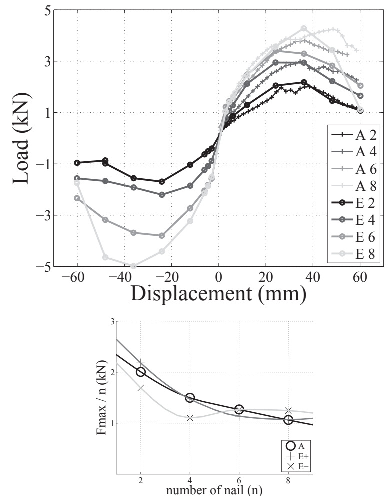


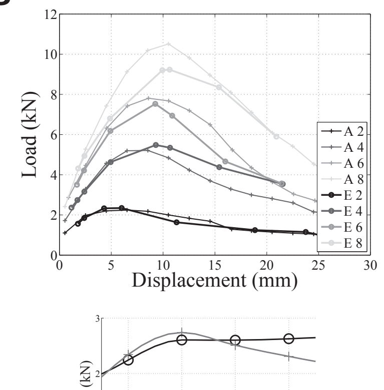
Assemblage « principale » d'un mur

Assemblage « secondaire » d'un mur

SISBAT - Modélisation des murs en dynamique

A l'échelle de l'assemblage

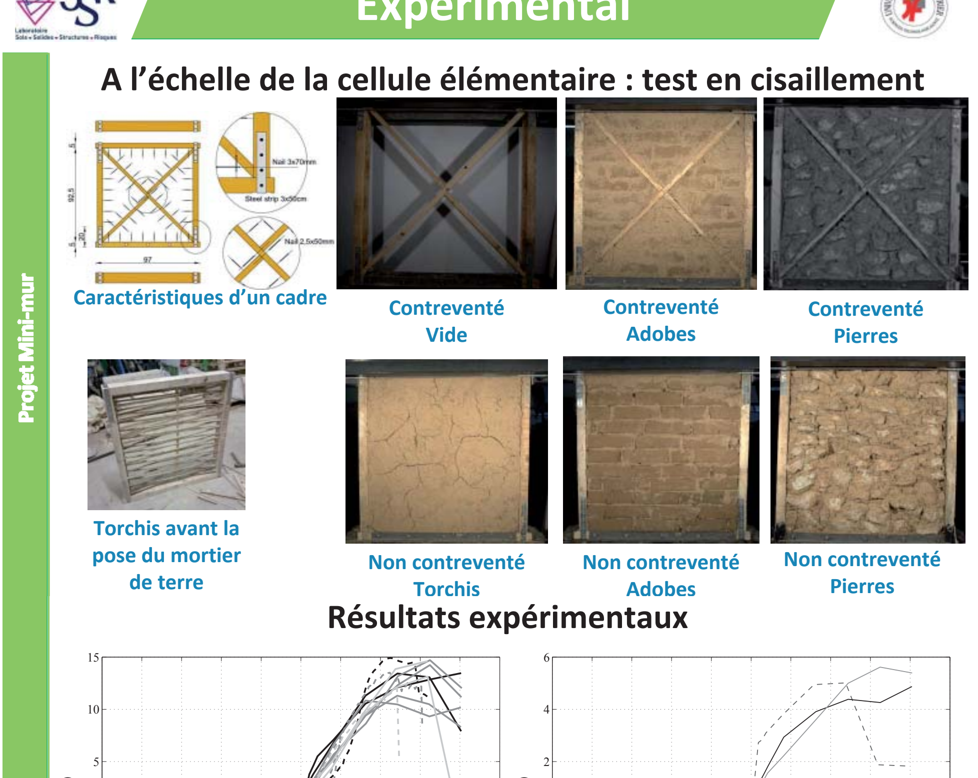




Mini-mur: cellule élémentaire







Projet Mini-mur

Résultats expérimentaux

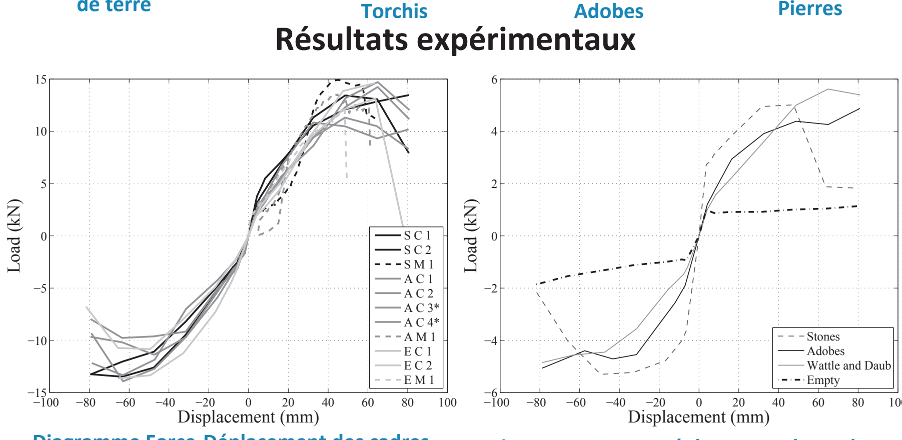


Diagramme Force-Déplacement des cadres contreventés

Diagramme Force-Déplacement des cadres non contreventés



Mur



Expérimental



A l'échelle du mur :

Essais de raideur et résistance au contreventement



Mur rempli : essai cyclique



Mur rempli : essai monotone

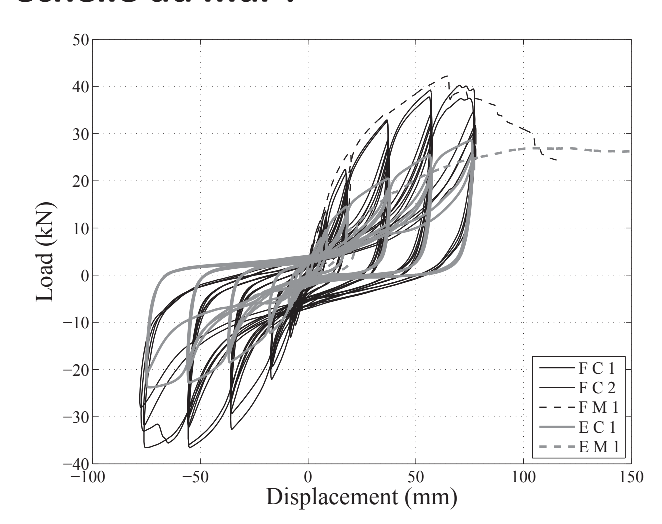


Mur vide : essai cyclique



Mur vide : essai monotone

A l'échelle du mur :



Maison

Modélisation



Analyse modale



Mode 1 – dir x
3.5 Hz – 24 %



Mode 2 – dir y
4.3 Hz – 62 %



Mode 6 – dir x
4.7 Hz – 11.8 %

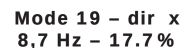


Mode 17 – dir y
8.1 Hz – 16 %

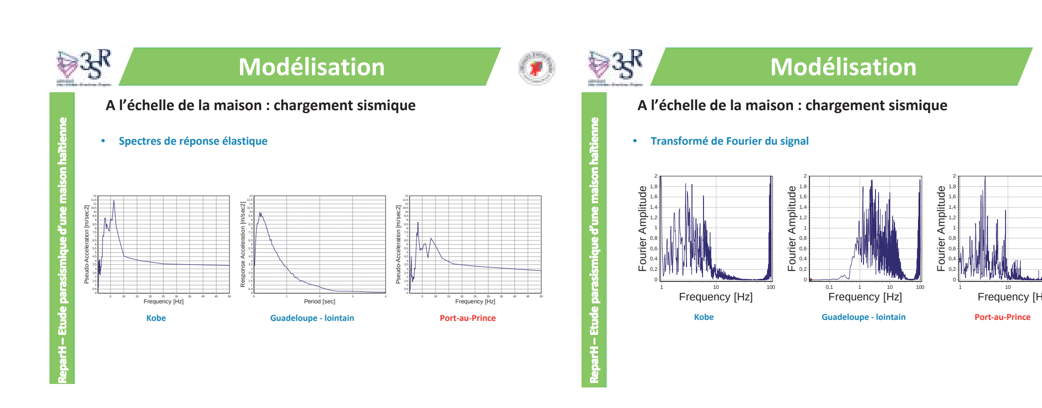


Mode 18 – dir x
8,5 Hz – 18.7 %





Mode 19 – dir x
8,7 Hz – 17.7 %



Travaux: Florent Vieux-Champagne

g) Les temps de mise en œuvre

Compte tenu du temps imparti, le prototype se devait d'être construit dans un délai similaire de quinze jours en laissant suffisamment de temps de séchage aux remplissages pour que les essais soient probants.
Comme contrainte supplémentaire, l'équipe de travail escomptée au départ, faite d'étudiants étant passés par des étapes intermédiaires de formation et de compréhension des principes structurels à mettre en œuvre, n'était plus la même, avec la non participation des étudiants du DSA Risques Majeurs. Le temps imparti pour la mise en œuvre comprenait donc un temps d'adaptation et de compréhension des contraintes techniques et des enjeux des essais.
Cf. planning de chantier.



h) La conformité avec les modèles construits en Haïti

Ces essais permettent de valider les hypothèses et les modèles de maisons déjà construites en Haïti, en apportant la garantie supplémentaire que ce ne sont pas des maisons au rabais ou des « T-shelters » : abris temporaires, comme étant une solution temporaire de courte durée et dans le temps de réponse à la seule urgence post désastre.
Ce projet se situe dans une approche de reconstruction et de développement. Outre la simple validation, la volonté est de convaincre de la pertinence de ces choix techniques qui rassureraient plus les bénéficiaires, les partenaires locaux, d'autres partenaires et bailleurs intéressés par cette démarche.
La démarche expérimentale apporterait donc certification à l'opérationnalité du projet en cours de construction sur le terrain. C'est la raison pour laquelle le processus de mise en œuvre du prototype se voulait similaire aux réalités de terrain.



Quelques modèles de maisons en Haïti



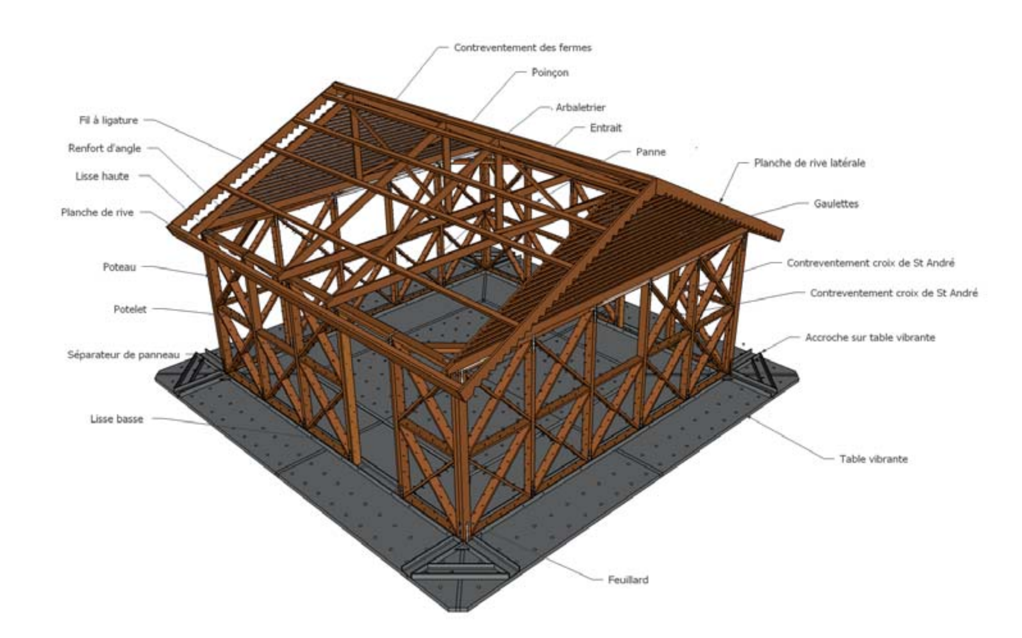


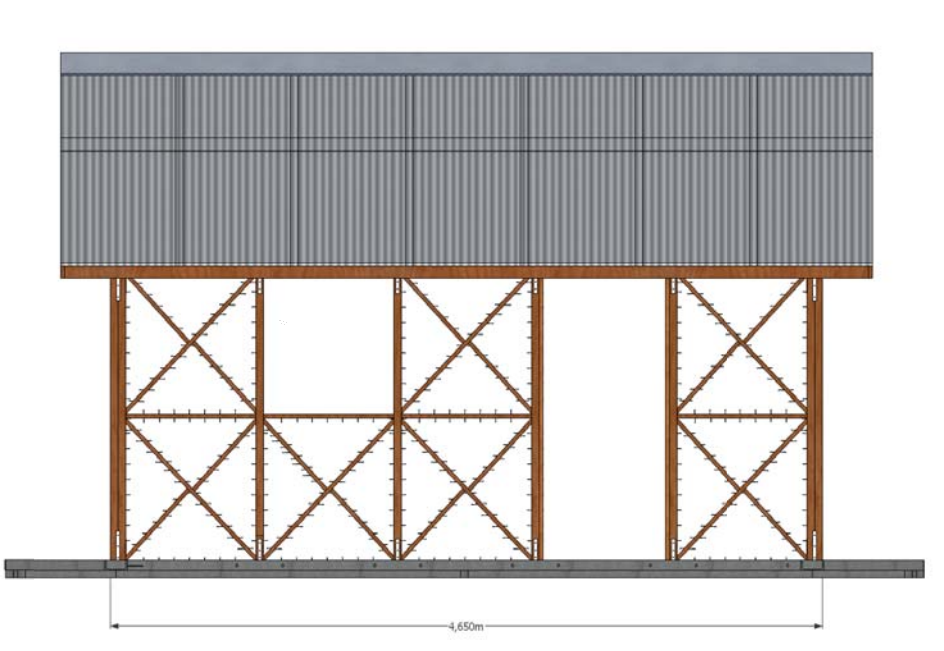
i) Le prototype





4,65 m X 4,65 m





3. Le FCBA

« L'Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement est un Centre technique industriel, FCBA a pour mission de promouvoir le progrès technique, participer à l'amélioration du rendement et à la garantie de la qualité dans l'industrie. Son champ d'action couvre l'ensemble des industries de la forêt, de la pâte à papier, du bois et de l'ameublement : sylviculture, pâte à papier, exploitation forestière, scierie, charpente, menuiserie, structure, panneaux dérivés du bois, ameublement, emballages et produits divers. Il travaille également avec divers fournisseurs de ces secteurs.
Ses activités se regroupent autour de trois grandes lignes :
• Mettre un savoir faire et des compétences reconnues à la disposition des entreprises : consultance, assistance technique, essai, formation, information...
• Accompagner les professions pour qu'elles occupent une place de leader sur les marchés nationaux, européens et internationaux : normalisation, qualité, technologies de pointe.
• Acquérir, centraliser, gérer et diffuser l'information scientifique et technique : recherche et développement, veille économique, réglementaire, technologique, documentation.
Pour favoriser les synergies et intervenir de façon plus efficace auprès des entreprises, le FCBA a développé des pôles transversaux au service des secteurs professionnels et de leurs acteurs.

Le pôle Environnement Santé accompagne les industriels dans leur développement durable, environnemental et sanitaire des produits.

Le pôle Economie, énergie, prospective propose des prestations de service autour d'études, d'analyses conjoncturelles et prospectives des marchés.

Le pôle Laboratoires Bois valide des essais et mesures des produits et process des entreprises.

Le pôle Nouveaux Matériaux développe des innovations à partir de matériaux à base de fibres.

Laboratoires Bois

Les laboratoires de FCBA mettent à disposition un ensemble de moyens et de compétences pour répondre de façon ciblée à des besoins en termes d'essais et d'expertises.

Laboratoire de biologie (entomologie, mycologie)

- Obtenir l'autorisation de mise sur le marché de produits en conformité avec les Directives Biocides et Phytosanitaires, le règlement Reach.
- Contrôler l'efficacité du traitement des bois dans le cadre d'expertises.
- Caractériser le bois et ses dérivés par rapport aux substances chimiques qu'il peut contenir ou émettre.
- Caractériser un produit de finition ou de collage.
- Mesurer la qualité de l'air dans les environnements intérieurs ou extérieurs.
- Etre conforme à la réglementation environnementale.

Laboratoire de chimie- écotoxicologie

- Essais biologiques d'efficacité.
- Essais écotoxicologiques.
- Expertise en dégâts biologiques.
- Expertise en identification d'essences.
- validation de nouvelles techniques de lutte anti-termites.
- Développement de nouveaux procédés de préservation du bois.
- Terrains d'expérimentation pour essais de champs.

Laboratoire de mécanique (matériaux, structures)

- Valoriser les qualités mécaniques du bois et de ses dérivés.
- Développer des systèmes constructifs performants.
- Apporter des preuves de performance.
- Répondre aux exigences réglementaires.
- Caractériser des produits ou des systèmes.
- Prouver l'aptitude de vos produits à un usage donné.
- Disposer de rapports d'essais reconnus en France et en Europe.

Laboratoire de physique

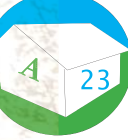
- Stabilité dimensionnelle des composants (parquets ou menuiseries) soumis à des ambiances climatiques variables.
- Réaction au feu d'éléments plans (murs et sols) selon les normes de classement européennes.
- Performances AEVM (Air, Eau, Vent, Mécanique) des menuiseries.
- Isolation acoustique de tout type de menuiseries, de revêtement de sol, de cloison ou de plancher.
- Efficacité de la réduction des bruits de choc des revêtements de sol.
- Résistance mécanique des menuiseries.
- Intervention in-situ pour essai AEV et Mécanique en entreprise sur centrale étalonnée.
- Conductivité thermique des matériaux.
- Essais acoustiques.
- Essais menuiseries.
- Essais réaction au feu. »

(Réf.: cf www.fcba.fr)

Partenaire du laboratoire 3SR dans le cadre du projet SISBAT, l'institut de technologie FCBA de Bordeaux dispose dans son laboratoire de mécanique d'une dalle sismique de type table vibrante qui convient comme équipement pour des tests sismiques : essais dynamiques mono-axiaux.

Une convention de partenariat tripartite a donc été signée entre 3SR, CRAterre et le FCBA pour s'associer la mise à disposition de l'équipement technologique, de l'accompagnement de l'expertise technique de pilotage des vérins hydrauliques de la dalle sismique, de l'expertise d'acquisition et de traitement des données de réaction de la table vibrante et de l'ensemble de l'équipement d'acquisition à un coût partenarial.

Cette collaboration, innovante, permettait un travail unique sur la caractérisation de ce type de structure et une meilleure compréhension de l'évolution de la structure en fonction de l'intensité du séisme.

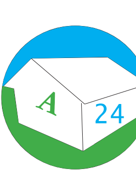




4. Les équipes de travail

Dans une logique de transfert de compétences et de formation d'étudiants en cours de post diplômes en architecture ou en ingénierie, futurs professionnels de la construction écosensible ou de la reconstruction post catastrophe, il avait été décidé en amont de la campagne d'essais sismiques à Bordeaux, de l'implication de 8 étudiants en cursus post diplôme dans les DSA (Diplôme de Spécialisation en Architecture) :
- «Risques Majeurs» de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris Belleville (ENSAPB),
- «Architectures de Terre» de l'ENSAG

Ces deux formations étant complémentaires dans le cadre de ces essais, la participation de ces étudiants était pédagogiquement cohérente.
Face à des contraintes de cohérence de calendriers pédagogiques d'une part, de formalisations administratives, pédagogiques et financières d'autre part, les étudiants du DSA Risques Majeurs, en quête essentiellement d'un stage long (4 mois minimum), ont malheureusement été contraints de décliner leur participation à la campagne d'essais.



Suite à un appel à manifestation d'intérêt dans la thématique de la construction parasismique dans le réseau CRAterre, une équipe de jeunes professionnels diplômés du DSA-Terre a été constituée, après sélections, pour suppléer la défection des étudiants du DSA-Risques Majeurs.

L'équipe permanente à Bordeaux:
- deux encadrants, Yannick SIEFFERT, Christian BELINGA NKO'O,
- deux étudiants « thésards » de 3SR, Jasim Taher MOHAMMAD, Florent VIEUX-CHAMPAGNE,
- deux étudiants du DSA-Terre ; Frédérique JONNARD, Sophie CLAUDE,
- trois architectes dplg, diplômés DSA-Terre, indépendants; Noro RAVOAVAHY, Juan TRABANINO, Fabrizio BOGHI,
- une professionnelle, plasticienne, enduits et sols en terre; Cécilia DOVERI,
- un charpentier-ébéniste, Nicolas BEGHIN,

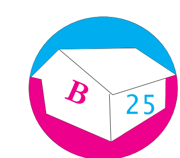
Supervision du chantier:
- Christian BELINGA NKO'O

Supervision des essais:
- un encadrant du laboratoire 3SR, ingénieur, Maître de conférence, Yannick SIEFFERT,
- un encadrant du laboratoire CRAterre, architecte dplg, chercheur associé, Christian BELINGA NKO'O,
- Etudiant en thèse, Florent VIEUX-CHAMPAGNE.

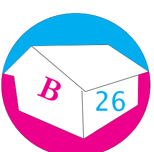
Equipe d'accompagnement :
- Simon PLA (acquisition des données pour 3SR),
- Annalisa CAIMI, architecte, thèse en cours, AE&CC,
- Majid HAJMIRBABA, ingénieur, chercheur associé, CRAterre,
- Olivier MOLES, ingénieur, enseignant, chercheur, CRAterre.

Direction du projet :
- Philippe GARNIER, coordinateur du projet ReparH, architecte dplg, enseignant, chercheur, CRAterre,
- Laurent DAUDEVILLE, ingénieur, professeur, 3SR / UJF,
- Stéphane GRANGE, ingénieur, maître de conférences, 3SR / UJF,

Equipe FCBA :
- Carole FAYE, Responsable de la recherche, laboratoire de mécanique,
- Patrice GARCIA, Directeur du laboratoire de mécanique,
- Jean-Charles DUCCINI, ingénieur sismique,
- Laurent MUNIER, ingénieur, chargé du pilotage des essais
- Jessy, atelier de menuiserie



PARTIE B : LE CHANTIER

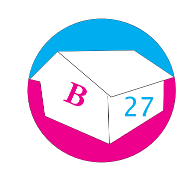


	ACTIVITES	L 1	M 2	M 3	J 4	V 5	S 6	D 7	L 8	M 9	M 10	J 11	V 12	S 13
1	Voyage et installation hébergement													
2	Briefing équipes / Présentation et répartition													
3	Installation de chantier													
4	Vérification matériaux													
5	Répartition outils													
6	Formation sur machines / Scie													
7	Achat outils manquants													
8	Découpe ossature bois													
9	Découpe et réalisation fermes													
10	Découpe et pliage des feuillards													
11	Assemblage de l'ossature bois													
12	Assemblage des murs éprouvettes													
13	Montage des fermes sur l'ossature													
14	Pose des pannes													
15	Pose de la toiture en tôle													
16	installation des clous													
17	Découpe du pit													
18	Tamisage de la terre													
19	Préparation des mortiers													
20	**Maçonnerie de pierres de la maison**													
21	Séchage maçonnerie de la maison													
22	Maçonnerie de pierres des murs éprouvettes													
23	Séchage maçonnerie des murs éprouvettes													
24	Instrumentation table vibrante													
25	Essais prototype maison													
26	Démontage proto maison nettoyage TV													
27	Installation murs													
28	Instrumentation des murs éprouvettes													
29	Essais murs													
30	Démontage des murs éprouvettes													
31	Nettoyage/rangement général													
32	Voyage retour													

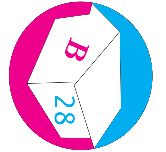
PLANNING CHANTIER FCBA AVRIL

avr-13

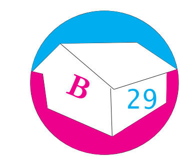
D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30



QUANTITATIFS



Désignation	Description	Quantité	Unité
Bois			
Terre à piser			
Terre à piser	0-25mm en big bag	5	u
Pierres			
Pierres calcaires	concassées 40/100 en big bag de 1,5T	5	u
Pit			
Sisal	sisal	100	l
Feuillard			
Feuillards 0,15x3x50	1 rouleau 50ml	1	u
Clous			
Clous	Clous 2,5x50	5	Paquet
Clous	Clous 3x70	5	Paquet
Clous à tôles		4	Paquet de 100
Tôles			
Tôle ondulée	34/100ème	28	
Tôle faîtière	Feuilles de zinc 0,65mm	3	u
Fil à ligature			
Fil à ligature galva	épaisseur 14 gauge. 1 rouleau 250 ml	1	rouleau (250m)
Film polyane			
Film polyane 190 microns	épais 1 rouleau	1	rouleau (50m)
Film polyane 60 microns	léger 1 rouleau / 6m / 246m²	1	rouleau (50m)
Divers			
Foret + écrous		1	
Banderolles		1	
Miroir		1	
Brosses + Eponges + spirales		9	
Sac plastique		1	rouleau
Location échafaudage	3 faces TV	1	



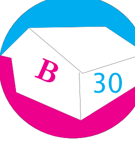
QUANTITATIF MATERIAUX CHANTIER BORDEAUX

N°	Désignation	Description	Quantité	Unité
1	**Bois**	(C18) Bois sec raboté		
		Prototype maison		
	10cm x 10cm x 4m	pour poteaux (1,9m x 4)	3	u
	5cm x 10cm x 5m	pour potelets (1,9m x 16)	16	u
		lisses basses (1,9m x 4) + (4,65m x 2)		
		lisses hautes (4,65m x 4)		
		Renforts d'angle (1,13m x 4)		
	2,5cm x 10cm x 5m	pour séparateurs de panneaux (0,85m x 18)	43	u
		contreventements croix de St André (1,24m x 34)		
		contreventements croix de St André (0,62m x 68)		
	5cm x 5cm x 6m	pour pannes (5,25m x 12)	12	u
	2,5cm x 2,5cm x 5m	pour gaulettes	50	u
		Mur éprouvette		
	10cm x 10cm x 4m	pour poteaux (1,9m x 2)	1	u
	5cm x 10cm x 5m	pour potelets (1,9m x 3)	2	u
		lisses basses (3,75m x 1)	1	u
		lisses hautes (3,75m x 1)	1	u
	2,5cm x 10cm x 5m	pour séparateurs de panneaux (0,85m x 3)	1	u
		contreventements croix de St André (1,24m x 8)	2	u
		contreventements croix de St André (0,62m x 16)	3	u
2	**Terre à piser**			
	Terre à piser	0-25mm en big bag	5	u
3	**Pierres**			
	Pierres calcaires	concassées 40/100 en big bag de 1,5T	5	u

1. Préparation / installation du chantier

La première journée a été consacrée à la prise de contact entre les équipes UJF/ENSAG et celle du FCBA.
Elle a permis de visiter le site, de faire le point sur les dispositifs de sécurité et de régler les différents aspects pratiques liés à la circulation sur le site du FCBA et à l'utilisation de l'atelier.

Cette journée préliminaire a également premis de fixer les modalités de déroulement des journées de travail ainsi qu'il suit:
début de journée par une réunion d'organisation de chantier.
Horaires de travail fixés :
De 8h à 12h30 et de 14h à 19h. De 18h à 18h30 nettoyage et rangement des outils et des espaces de travail. De 18h30 à 19h rédaction du résumé de la journée et brainstorming qui ont permis de faire face aux contraintes du jour et de relever des questionnements.





Les activités:

- Organisation de l'espace de travail
- Installation de chantier
- Installation de l'échafaudage
- Protection de la table vibrante avec des bâches plastiques
- Protection du dessous de la table vibrante
- Délimitation de la zone de stockage de la terre tamisée
- Détermination de la zone de séchage de la terre à l'extérieur du bâtiment
- Présentation des caractéristiques techniques de la table vibrante



Livraison des matériaux



Réunion de travail



Réception des matériaux sur le chantier et rangement



Table vibrante uni axiale

Principales Caractéristiques

Noyau central

Dimensions	3 m × 3 m
Matière	Aluminium
Poids	2 tonnes

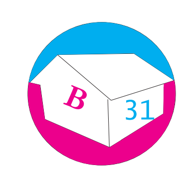
Avec Extensions

Dimensions	6 m × 6 m
Poids	4 tonnes

Déplacement Max	±125 mm
Vitesse Max	0.75 m/s
Accélération Max	≅ 8g table nue sans extension
	≅ 4g table nue avec extension
Gamme de fréquences	jusqu'à 30 Hertz
Charge utile	10 tonnes/m (a affiner avec et sans extension)



Présentation des caractéristique de la table vibrante à l'ensemble de l'équipe







Protection de l'équipement avec du film polyane translucide



Installation de l'échafaudage

2. Terre / Mortier

Les activités:

- Séchage de la terre arrivée trop mouillée
- Retournement et criblage la terre mise en séchage
- Découpage du feuillard
- Tamisage de la terre (1,5 big bag)
- Découpage du sisal (200 l)
- Aménagement d'un espace de travail pour le mortier
- Début de mortier (25 seaux de terre)
- Préparation des mortiers (1,5 big bag)
- Etalage du 4ème big bag de terre à l'extérieur pour séchage
- Nettoyage de la zone de production du mortier
- Protection et sécurisation de la table vibrante et de ses abords



Contraintes et solutions

La terre livrée était trop mouillée et nécessitait un séchage préalable avant tamisage pour l'obtention d'une granulométrie convenable pour la production du mortier. Elle a donc été étendue sur différentes surfaces à l'extérieur de l'atelier pour accélération du séchage. Problème, une météo défavorable qui risquait d'en limiter le processus. Une bâche a été prévu pour pouvoir couvrir les terres ainsi exposées en cas de pluie.





Séchage





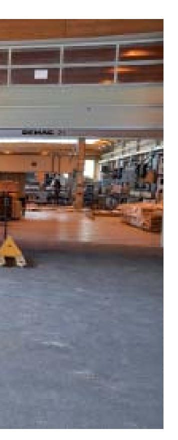
Criblage



Tamisage



Stockage de la terre

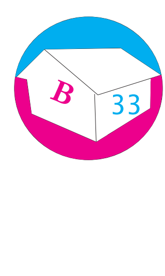




Découpage du sisal









Transport





Mélange



Malaxage

tamisée





Mortier prêt à l'emploi

3. Ancrage

Compte tenu des contraintes de fixation de la maison sur la table vibrante ; à savoir, la non dissipation de l'énergie ailleurs que dans la structure et la protection de l'équipement notamment, la solution d'un bâti métallique avait été trouvée pour servir d'interface entre le prototype et la table vibrante.

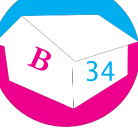




Repérage, positionnement et serrage

Les activités:

- Réception du système d'ancrage de l'ossature à la table vibrante
- Préparation des tiges filetées (découpe et ponçage des têtes de filetage pour le passage des écrous)
- Fixation de l'ancrage
- Repérage des trous pour tiges filetées sur les lisses
- Installation du bâti d'ancrage





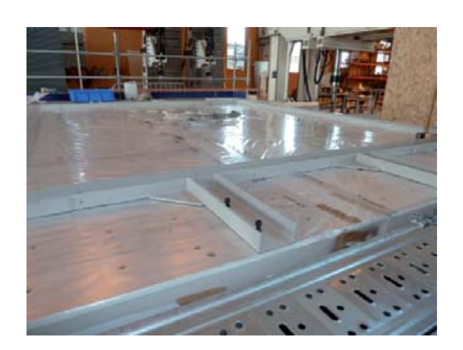


Contraintes et solutions

Le bâti d'ancrage ne sera installé que le lendemain, ayant lui aussi un léger retard dans son installation.

Le bâti acier d'ancrage nous a été livré présentant quelques malfaçons dans l'axialité des trous de fixation. Solution, élargissement desdits trous et correction de la position dans les lisses et le bâti.





Ajustement

4. Ossature bois

Contraintes et solutions

Réflexion entamée sur la meilleure façon de solidariser la structure à la table. En effet le confinement de travail dans et autour du bâti rend l'installation de l'ossature bois difficile. Solution faire un pré-positionnement de la lisse basse dans le rail puis faire un marquage avant perçage à l'aide de la colonne.

Bois humide et déformé, difficile à œuvrer. Percement des trous à la colonne.

Un débat sur le positionnement des clous dans le feuillard et leur nombre a eu lieu. L'expérimentation et la pratique sur le chantier sont divergentes. Les essais pourront éventuellement modifier les fiches techniques sur ces deux aspects.

L'humidité du bois a été testée par une sonde, résultat environ 30% d'humidité dans les bois. Le caractère non sec peut être une contrainte mais au vu de ce qui se passe en réalité sur les chantiers, on est assez proche de la réalité

Reprise de la ligature des fils mal réalisés, mise en place d'un nouveau système d'attache en bout : quatre brins.

Questionnement

Discussion autour de la position des éléments de contreventement

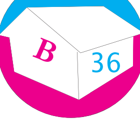




Réajustage des percements dans les lisses basses pour s'adapter au bâti métallique d'ancrage.

Les activités:

- Détermination d'une zone de stockage du bois
- Installation des machines
- Découpage du feuillard
- Réalisation de la fiche de débit des pièces de bois
- Réception du bois
- Découpage des lisses basses
- Repérage des trous pour tiges filetées sur les lisses
- Pliage du feuillard
- Préparation des fils à ligature (20 de 75 cm et 8 de 1m)
- Débit des sections de bois pour le reste de l'ossature
- Réalisation des entailles sur lisse basse pour le passage des feuillards
- Montage du mur éprouvette
- Finalisation des percements sur les lisses basses
- Réalisation des renforts d'angle
- Réalisation d'un pan de mur avec porte (vue droite)
- Echanges sur la procédure de montage de la structure au sol puis sur la table
- Réalisation et montage du 2ème mur
- Début de réalisation du 3ème mur
- Pré débitage des croix de St André et des éléments de toiture










Préparation, débit et perçage des sections de bois



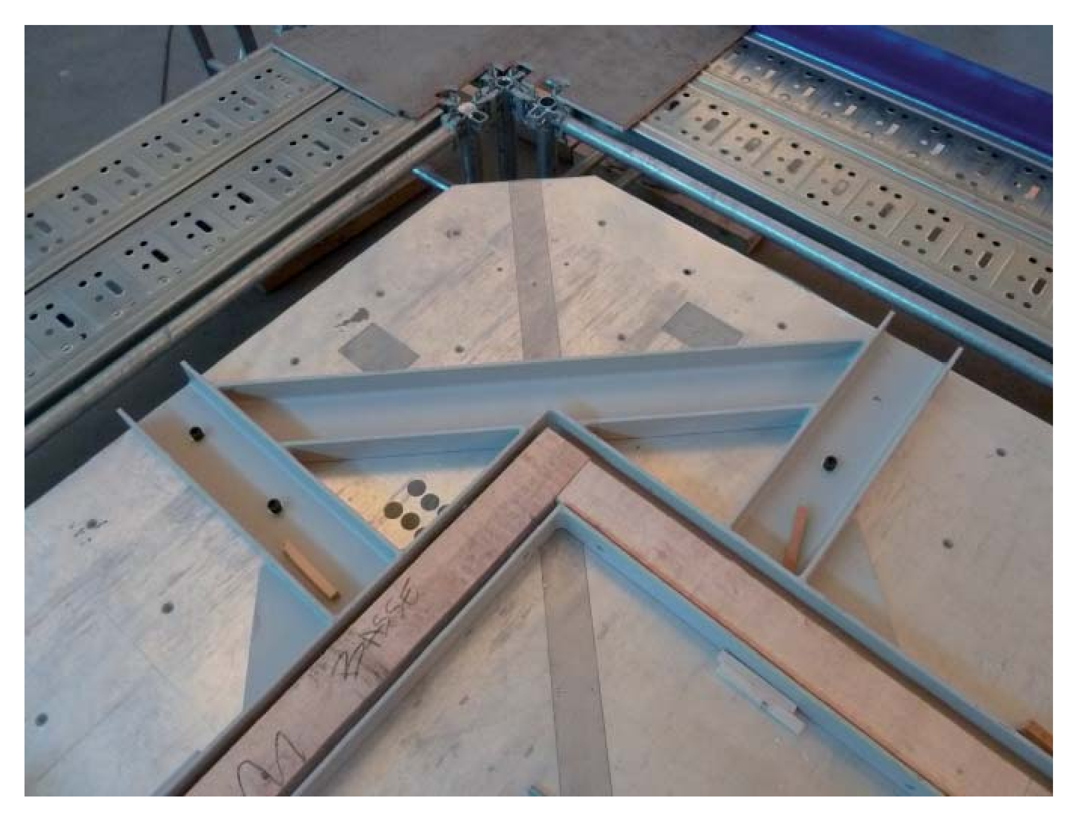

Pliage et découpage des feuillards




Assemblages



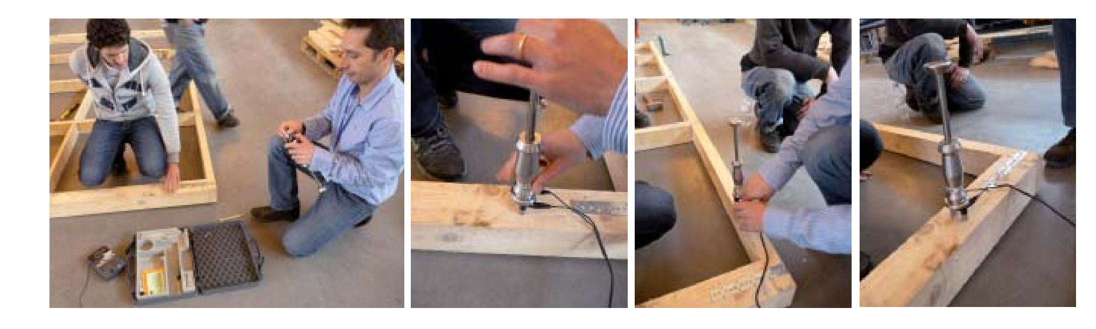




Premiers essais non concluants d'assemblage des lisses dans le rail métallique.



Echanges sur les stratégies de levage et de montage de l'ossature bois dans le bâti métallique.



Tests de taux d'humidité dans les bois utilisés



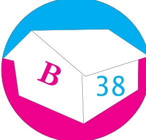




Réalisation d'un pan de mur sur deux sans poteaux pour effectuer l'assemblage directement dans le rail.

Les activités:

- Réalisation de la ligature des fils
- Pose des contreventements sur le mur éprouvette
- Montage et fixation des deux derniers murs
- Pose des poteaux
- Pose des renforts d'angle
- Fixation des cales avec les tiges filetées
- Pose des clous d'interface de remplissage pierres
- Fixation du mur éprouvette
- Pose des clous sur le mur éprouvette
- Numérotation et prise en photos de tous les assemblages pour comparaison après ruine
- Terminaison de la pose des clous pour maçonnerie
- Croquis















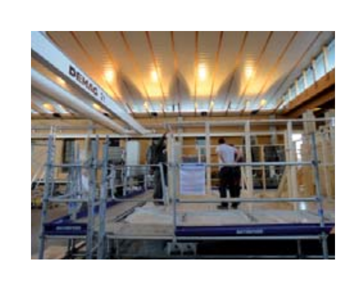
















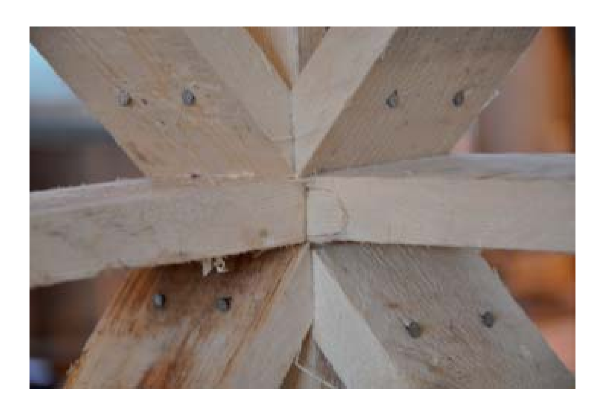
Renforts d'angles



Pose des contreventements

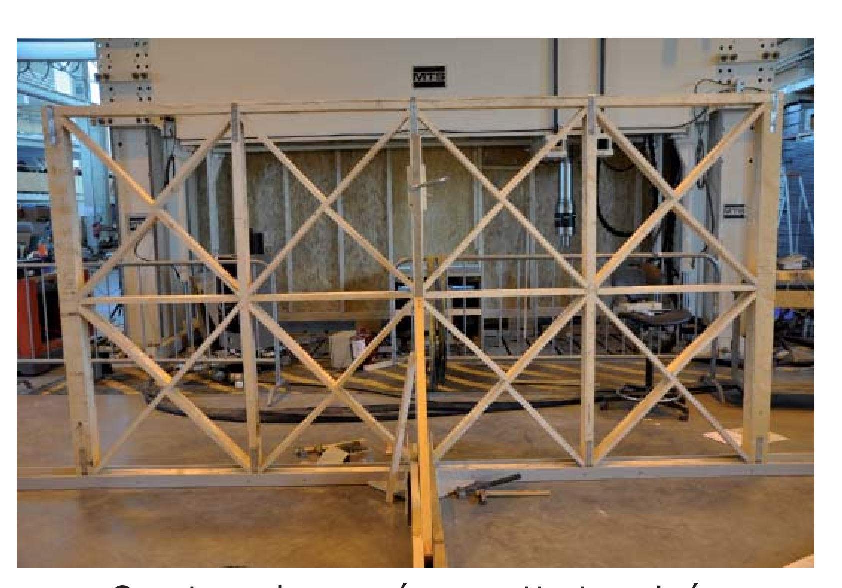








Contreventements

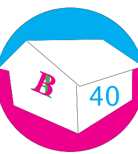


Ossature du mur éprouvette terminée

5. Charpente / Couverture

Les activités:

- Débit des sections de bois pour le reste de l’ossature
- Préparation des fils à ligature
- Réalisation des 4 fermes et litellage bois
- Réalisation des gaulettes sur deux fermes
- Réalisation des ligatures pour les attaches de toiture et des fermes
- Clouage des pannes
- Réalisation de la ligature des fermes et pannes
- Réalisation des planches de rives en pignon
- Rallonge des pannes (4)
- Pose et ligature des fermes
- Pose et ligature des pannes
- Réalisation et pose des contreventements de fermes
- Pose des planches de rive latérales Sud
- Découpe, assemblage et mise en œuvre des planches de rives
- Découpe des tôles
- Découpe des lés de tôle faitière
- Pose des 4/5 de la toiture (tôle plus épaisse et donc plus difficile à percer notamment sur les recouvrements.
- Pose d’1/3 de la tôle faitière
- Terminaison de la pose de la toiture
- Terminaison de la pose de la tôle faitière



Contraintes et solutions

Quatre des douze pannes ayant été coupées trop courtes, une allonge a été posée : clouage + ligature ; conformité avec le terrain.

Manque des bois pour la réalisation des planches de rive de 2,5 cm x 15 cm. Les planches de rives ont donc été réalisées avec une hauteur de de 10 cm et non 15 cm comme sur le terrain. Il a été pris en compte le fait que leur rôle de rigidification de la liaison des pannes en bout est bien joué et que c’est celui là qui est considéré dans les essais. Leurs autres rôles, notamment celui de briser les lames d’air en cas de vent violent, ne sera pas testé dans ces essais. Ce facteur n’est donc pas pénalisant pour le travail effectué ici, il pâtira toutefois d’un léger manque d’esthétique.

Le manque de repère parfaitement perpendiculaire sur les fermes contraint à aligner minutieusement les tôles. Bien posées, les tôles participent à contreventer la toiture.





Divers travaux de préparation au sol





Habillage des fermes-pignons





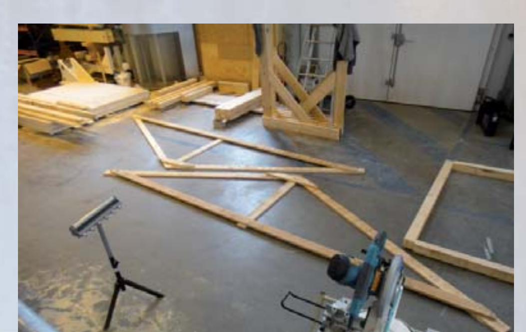
Découpage des tôles et faîtières

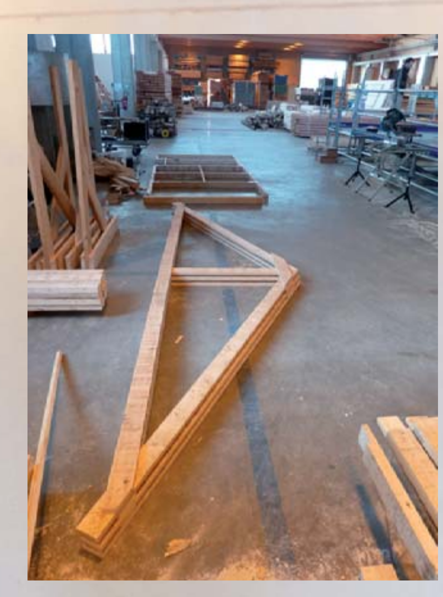




Levage, positionnement et contreventement des fermes







Réalisation des fermes









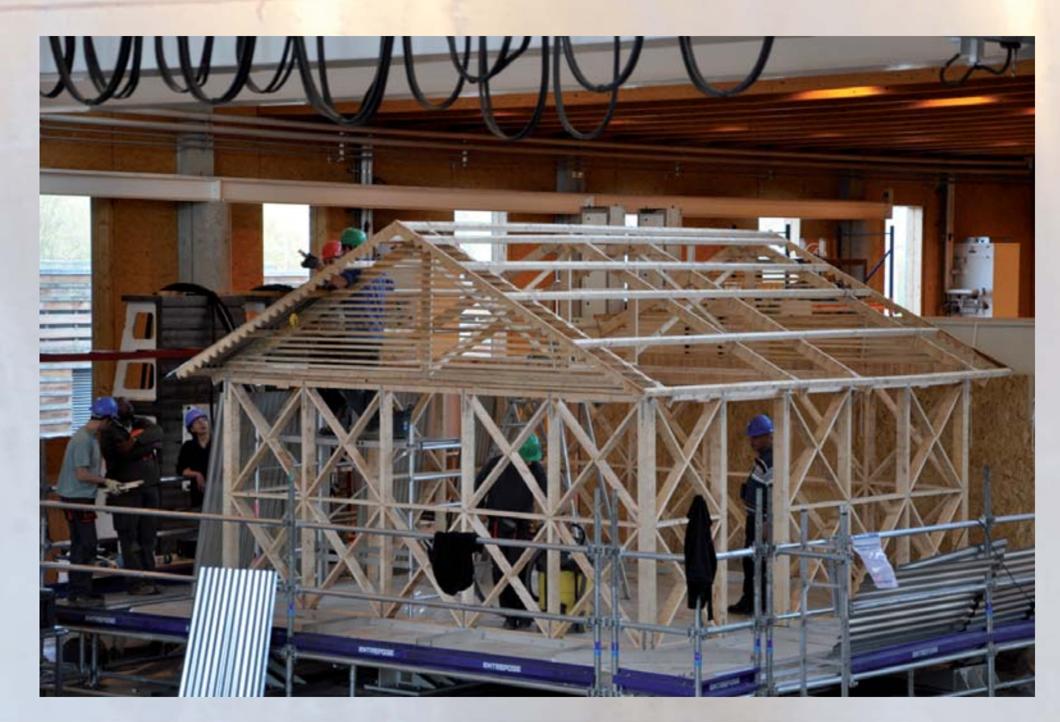








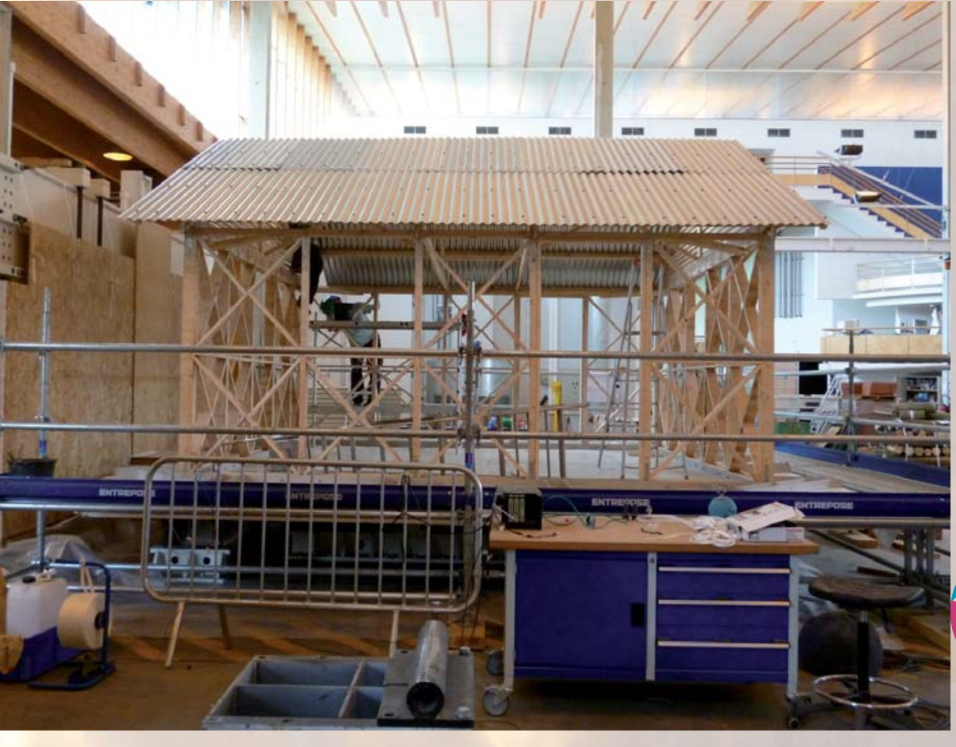


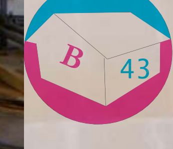





DEMAG 2t

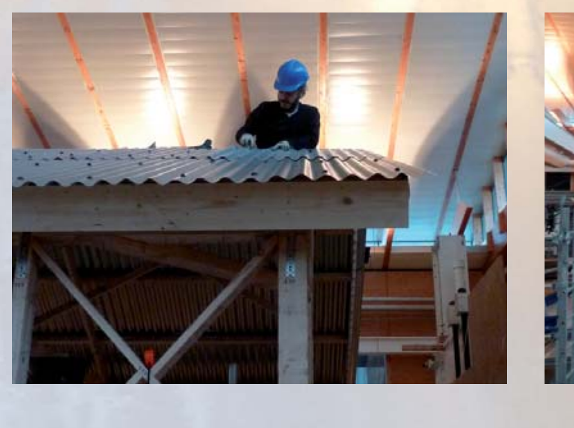



ENTREPOSE


B
43









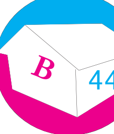

ENTREPOSE

6. Remplissage

Les activités:

- Clouage des pointes sur les séparateurs de panneaux et croix de St André
- Choix des pierres de même gabarit
- Taille des pierres non au gabarits souhaités
- Correction de l'état hydrique du mortier
- Maçonnage des panneaux

Contraintes et solutions



Eu égard à la déconvenue liée à la non participation d'une partie des étudiants formés et familiarisés avec la technique de maçonnerie mise en œuvre ici ; à savoir des petites pierres enchâssées dans un cadre en bois de 10 cm d'épaisseur et maçonnées avec un mortier de terre armé de fibres de sisal, la période dévolue au remplissage était l'une des plus tendues du chantier. En effet, compte tenu de la date prévue pour les essais, il fallait non seulement terminer le remplissage de tous les panneaux, mais également permettre à ceux-ci de sécher pour supporter les essais.

La plage du planning prévue pour le remplissage a été entièrement utilisée, ne laissant que peu de temps au séchage. Pour résoudre cette contrainte, diverses solutions ont été utilisées :

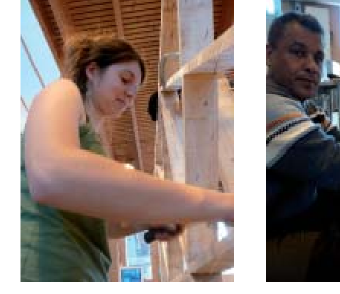
- Le bâchage de l'ensemble de la maison avec du polyane de manière à permettre le séchage rapide. Contrairement aux objectifs et malgré la présence de ventilateurs, le polyane emprisonnait plutôt l'humidité sous cloche.
- L'utilisation de déshumidificateurs professionnels pour accélérer le séchage. Cette solution avait été planifiée comme solution de substitution en cas de restriction du temps disponible entre la fin de la maçonnerie et le début des essais. Déjà éprouvée lors des essais en Italie (CNR IVALSA), cette solution a été fort utile et salutaire, ayant accéléré la dessiccation des panneaux. Là aussi, il fallait surveiller le processus afin que le séchage ne soit trop rapide et ne provoque par conséquent la fissure des murs.



















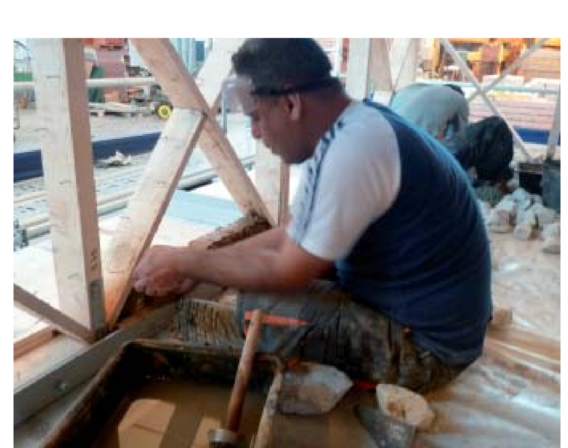




















































Différents rendus de la maçonnerie en cours de nettoyage et de séchage

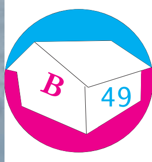










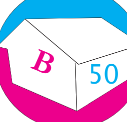


Dispositifs d’accélération du séchage de la maçonnerie








B
50





6. Démontage

Réajustage des percements dans les lisses basses pour s'adapter au bâti métallique d'ancrage.

Une des obligations majeures du cahier des charges concernait la remise en l'état de l'équipement et de l'espace mis à disposition dans le laboratoire. La protection de la table et de ses environs au début du chantier participait de cet objectif.

Il nous revenait également d'assurer le démontage de la maison et du mur éprouvette, puis d'en gérer le tri des matériaux.











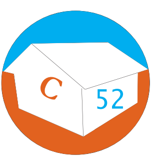












PARTIE C : ESSAIS SISMIQUES


ANR

I- LA PROCEDURE SCIENTIFIQUE DES ESSAIS

La procédure ci-après a été arrêtée à la suite des différentes réunions préparatoires de la campagne des essais. Elle a cependant évolué à la suite des réunions en cours de chantier durant le mois d'avril à Bordeaux. Il est donc important d'en avoir l'aperçu ici pour comprendre l'évolution des essais tels qu'ils ont été réalisés.

1. Objectifs des essais

Cette campagne d'essais avait pour double objectif :

- de mener à terme le protocole de mesures et d'acquisitions fixé lors des réunions préparatoires d'octobre 2012 et de février 2013. Ce, afin d'apporter à la recherche expérimentale un maximum de données permettant de caractériser le comportement de telles structures et d'échafauder une méthodologie comportementale après comparaison avec les modèles numériques expérimentaux.

- d'éprouver sismiquement le prototype pour vérifier sa capacité à résister à un séisme de puissance équivalente à celui de 2010. Ce, pour continuer à améliorer techniquement la résilience des modèles construits et communiquer pour une meilleure adhésion et une meilleure appropriation de ce système par le secteur de la construction de l'habitat rural notamment en Haïti.

2. Protocole des essais

Un travail de traitement et de mise en conformité a été effectué par le Centre d'Étude Technique et de l'Équipement (CETE) Méditerranée rattaché à l'université de Nice Sophia Antipolis en collaboration avec le laboratoire 3SR afin que le FCBA dispose du signal du séisme d'Haïti de 2010, à jouer sur la table vibrante lors des essais.
De nombreux autres aspects ont été discutés et adoptés pour améliorer la procédure des essais.

a) La méthodologie du choix du séisme :

- choisir une gamme de fréquences au plus près de la fréquence propre de la structure et qui puisse être amplifiée,
- mettre en entrée, un signal d'essai,
- tester le séisme lointain, «zone d'aléa sismique de Guadeloupe», qui puisse être joué très haut à plus de 1g (380%),
- calibrer un signal devant avoir un temporel qui démarre à 0 et qui reparte de 0 pour un meilleur recalage ; signal naturel

[Temporel ⟶ Accélération ⟶ Constante]

b) Les contraintes de la table vibrantes :

- Limites de déplacement [+10cm - 10cm],
- Accélération de 1 g maximum avec un poids maximum de la maison de 8 tonnes.

3. La procédure des essais

La procédure consiste à calibrer la table vibrante en comparant les graphes du signal (modélisation et bruit blanc), puis à exciter progressivement la structure pour en avoir une réponse et connaître la fréquence propre (fréquence de résonance, spectre de réponse aux chocs,…).

a) Les questions que soulève cette procédure :

- Type et niveau d'endommagement de la structure ainsi sollicitée à différentes intensités faibles du séisme choisi?
- Quelles conséquences au moment de passer le séisme voulu à 100% ?
- Quel comportement de la structure ?
- Quelles modalités d'analyse et de compréhension des résultats ?

b) Description de la procédure initiale :

étape 1. Analyse Modale Expérimentale (AME) initiale (avec, entre 60 et 100 points de mesure, afin d'avoir une information suffisante de la structure sans que cela entraîne l'endommagement de celle-ci.
Pour information, 100 points de mesure nécessitent la réalisation de 30 bruits blancs réalisés à un niveau d'énergie ''bas''- environ 10% -. Ce qui consiste à 30 fois 30 secondes d'excitation de la structure à faible puissance.

étape 2. Séisme à 50% de son intensité réelle (afin de ne pas trop endommager la structure mais de la solliciter significativement)

étape 3. Bruit blanc (à environ 0,1g, observer l'endommagement)

étape 4. Séisme à 100% de son intensité réelle,

étape 5. Bruit blanc (à environ 0,1g, regarder l'endommagement)

étape 6. Puis alternance séisme / bruit blanc tant que la maison résiste et que les limites de la table ne sont pas atteintes.

Pour référence, la procédure inscrite dans le rapport SISBAT peut servir d'exemple.
«Le diagramme ci-après représente verticalement les différentes étapes d'un essai. À chaque étape figurent dans la colonne de gauche les données d'entrées, au centre les opérations effectuées sur la toiture et à droite les données de sorties.»
Réf.: SISBAT

Type de toiture
Sens d'essai

Montage
toiture sur table

Mesure des flèches
sous charge de tuile

Flèches

Bruit blanc

AME étape 1
(initiale)

Fréquence propres
Déformées modales
Amortissements modaux

Signal sismique & Bruit

Essais sismiques
Niveaux 0% à 100%

Alternance
Seisme 20%
Bruit
Seisme 40%
Bruit
....

FRF
Signaux temporels
Spectres

Bruit blanc

AME étape 2
(après seisme 100%)

Fréquence propres
Déformées modales
Amortissements modaux

Signal sismique & Bruit

Essais sismiques
Niveaux 100% à Fin

Alternance
Seisme 100%
Bruit
Seisme 140%
Bruit
....

FRF
Signaux temporels
Spectres

Bruit blanc

AME étape 3
(fin d'essai)

Fréquence propres
Déformées modales
Amortissements modaux

NOTES :
AME : Analyse Modale Expérimentale
FRF : Fonction de Réponse en Fréquence

4. Acquisition

Le dispositif d'acquisition était composé de capteurs à fil, de capteurs LVDT et d'accéléromètres. L'ensemble de ce matériel d'acquisition de données permettait notamment l'Analyse Modale Expérimentale (AME) et les essais dynamiques. Le système électronique du FCBA permettait de mettre à disposition, 12 voies dont 2 réservées pour le vérin et la table. En complément, le laboratoire 3SR avait apporté du matériel supplémentaire d'acquisition en plus des dix voies déjà disponibles.

En plus de l'équipement d'acquisition des données,du matériel de capture vidéo était à disposition pour la communication et l'analyse visuelle du comportement structurel du prototype :

- 3 caméras HD
- 2 caméras (+ pendant les essais – externes -)
- 1 webcam
- 3 appareils photos
- 1 appareil photos avec intervallomètre
- ...

Pour un travail expérimental de corrélation d'images (3SR), était également mis en place un dispositif spécial de filmage en caméras rapides ; soit quatre caméras à hautes fréquences.













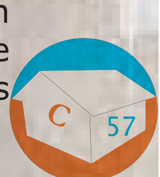


5. Valorisation des essais

a) Pour la recherche

Pour le travail de thèse ils apportent une somme d'informations qui participent à étayer l'analyse expérimentale numérique multiscalaire et la rédaction de celle-ci.
Ils feront dans ce cadre l'objet de plusieurs publications d'articles scientifiques à venir, sur la modélisation, l'expérimentation, la corrélation d'images, la collaboration architectes et ingénieurs dans la recherche, et ce, dans des revues spécialisées ainsi que des communications lors de colloques.

Pour la synergie d'équipe, ils valorisent la collaboration avec le FCBA et donc l'équipement table vibrante ainsi que la ressource humaine qualifiée qui pilote cet outil pour des projets similaires voire autres.



b) Pour l'opérationnalité

L'action de terrain, malgré les 600 unités de maisons déjà construites, a besoin d'arguments, notamment scientifiques forts, pour finir de convaincre les partenaires locaux et installer cette approche au même rang que celles qui privilégient systématiquement les matériaux industriels importés.
La logistique des projets de construction en milieu rural en Haïti étant peu évidente (absence de routes carrossables, manque de bons agrégats, bòs maçons peu disponibles et peu formés, …), la valorisation de l'emploi des matériaux locaux et des savoirs constructifs associés ont besoin de visibilité. A cet effet, cette campagne y participe activement. Dans la mesure où d'autres bailleurs sont intéressés, cet argument scientifique est un atout fort.

II- LES ESSAIS SISMIQUES

1. Analyse modale

L'expérience acquise sur le projet SISBAT a permis d'arrêter la procédure d'essai suivante après avoir envisagé toutes les options dont la pertinence de l'essai à 100% avec le signal d'Haïti de 2010:

Montage
structure sur
table

Bruit
blanc

Analyse modale

Fréquence propres
Déformées modales
Amortissements modaux

Signal
sismique
&
Bruit
blanc

Essais sismiques
Niveaux augmentent
jusqu'à rupture

Alternance
Séisme
Bruit
Séisme
Bruit
....

FRF
Signaux accélérations et
déplacements temporels
Spectres

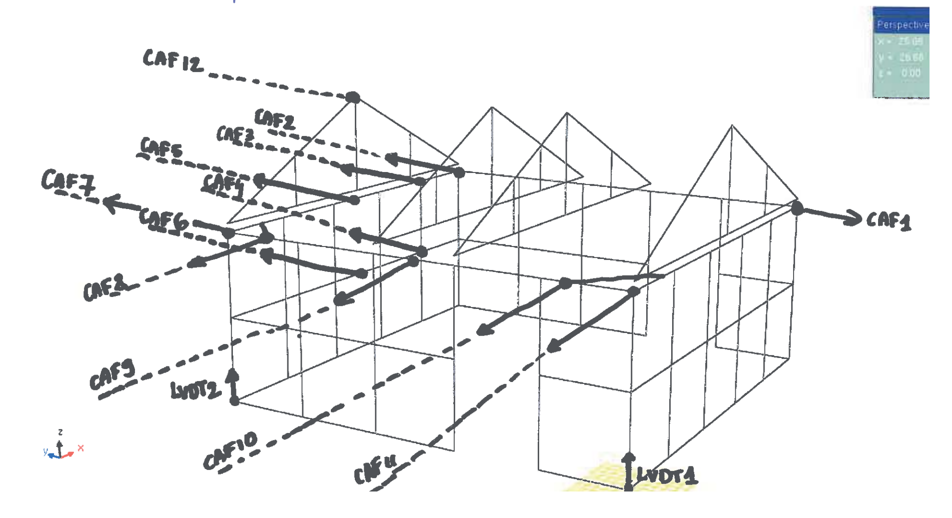
NOTES : AME : Analyse Modale Expérimentale
FRF : Fonction de Réponse en Fréquence

Fig. 6.1 : Déroulement de l'essai d'un mur

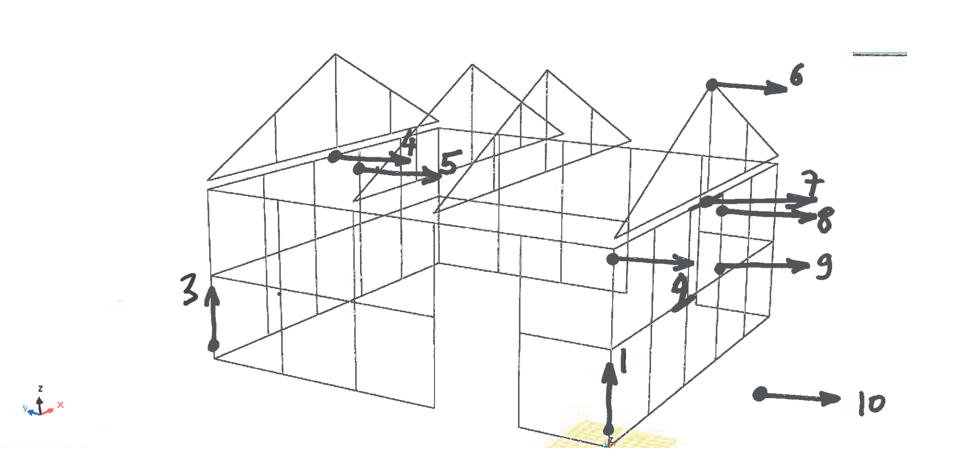
Le but de l'analyse modale est de caractériser la structure (maison et mur éprouvette) à exciter sismiquement avant que n'ait lieu l'essai. Elle permet ainsi d'établir fréquences propres, amortissements et déformées modales associés. Elle permet la comparaison d'un état initial de la structure avant l'essai et celui après.

Le principe a consisté à utiliser un bruit blanc (signal de faible intensité) joué sur la table vibrante pour enregistrer ainsi les différents modes de la structures.

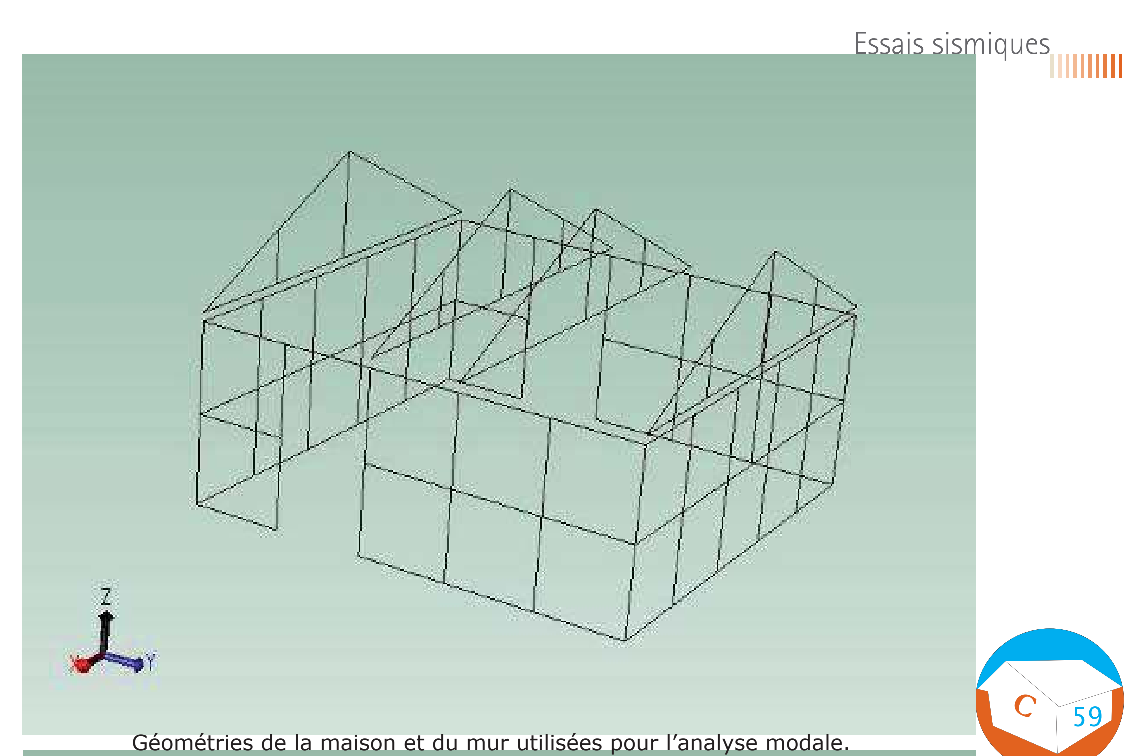
Cette analyse modale a fait l'objet de vifs échanges eu égard aux nombreux enjeux scientifiques, pédagogiques, opérationnels et financiers de l'essai. Pour finir, la structure a plutôt bien tenu à la trentaine de passages de 30 secondes à une minute chacun qu'elle a subit pour l'obtention de sa modélisation.



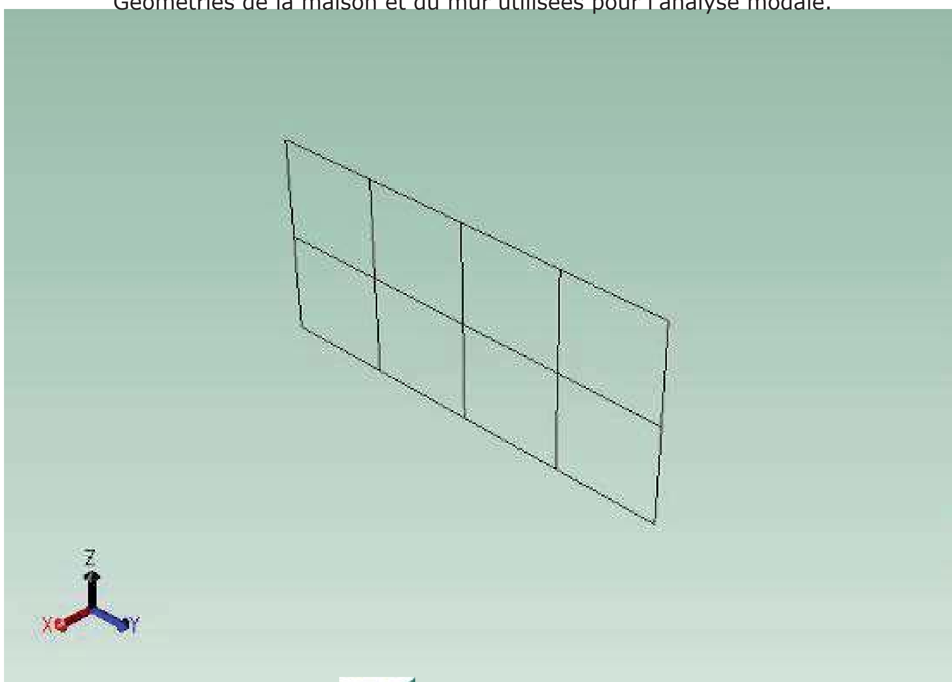
Position des capteurs à fil



Position des accéléromètres



Géométries de la maison et du mur utilisées pour l'analyse modale.



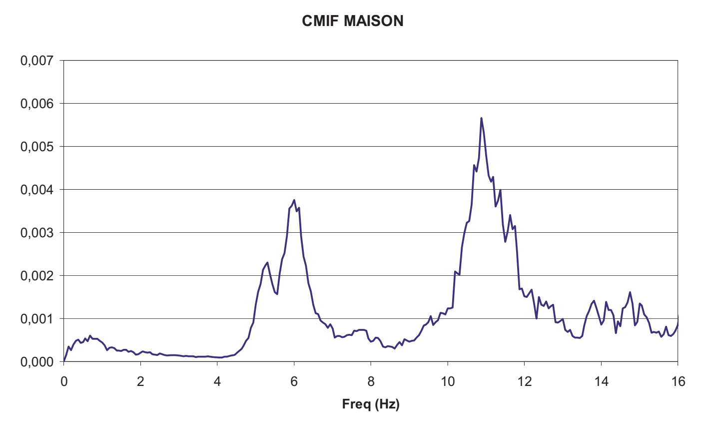
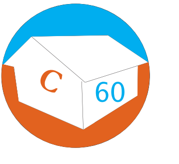


Fig. 9.1 : Courbe CMIF issue de l'analyse modale de la maison

CMIF (Complex Mode Indicating Function).



Mode	Fréquence de résonance (Hz)	Amortissement (%)
1	5.2	5.2
2	5.9	5.7
3	10.9	5.3

ANALYSE MODALE - MAISON

On observe la présence de 3 modes. Deux à des fréquences très rapprochées (5.2 Hz et 5.9 Hz) sont les modes de déformation en ventre des murs perpendiculaires à la sollicitation. Le troisième à une fréquence plus élevée (10.9 Hz) est le mode de déformation en parallélogramme des murs latéraux.

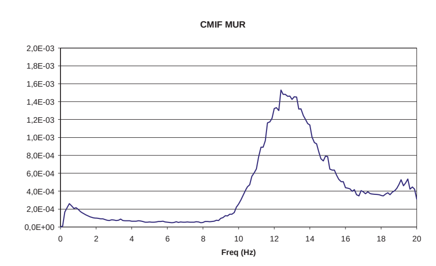
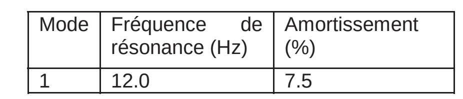
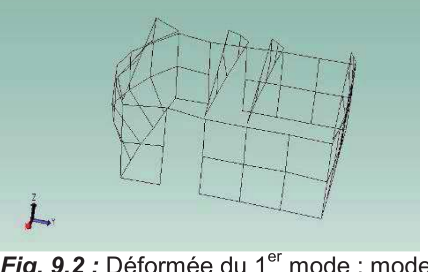


Fig. 9.5 : Courbe CMIF issue de l'analyse modale de la maison



Mode	Fréquence de résonance (Hz)	Amortissement (%)
1	12.0	7.5



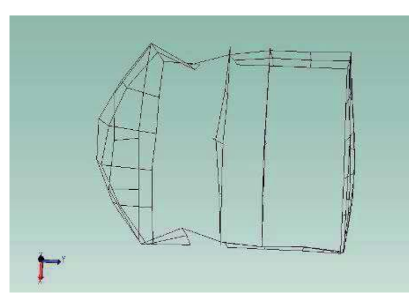
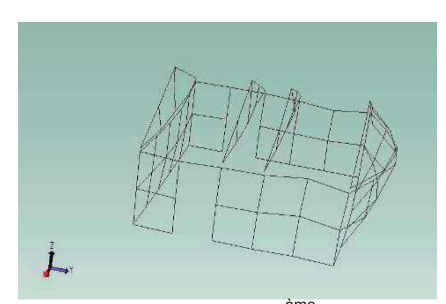


Fig. 9.2 : Déformée du 1er mode : mode de mur AV (côté portes)



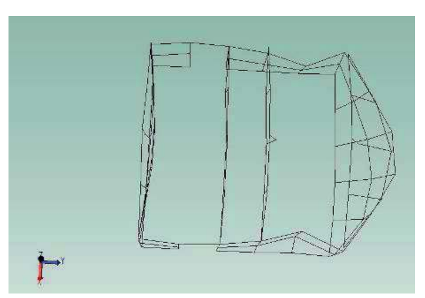


Fig. 9.3 : Déformée du 2ème mode : mode de mur AR

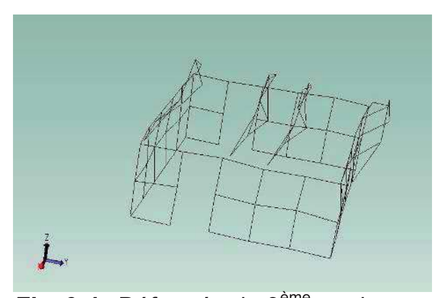
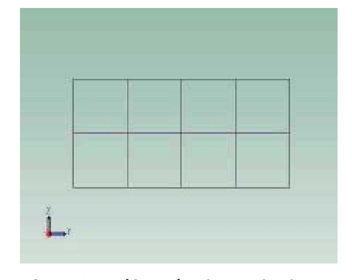


Fig. 9.4 : Déformée du 3ème mode : mode de murs latéraux – déformation en parallélogramme



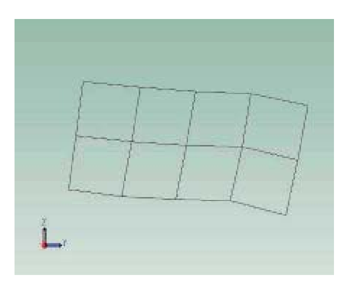


Fig. 9.6 : Déformée du mode de mur (gauche : non déformé, droite : déformé)







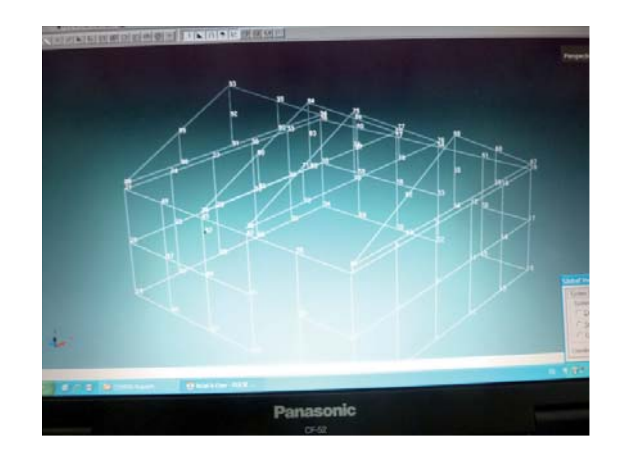


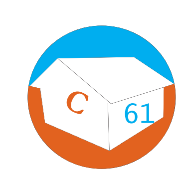


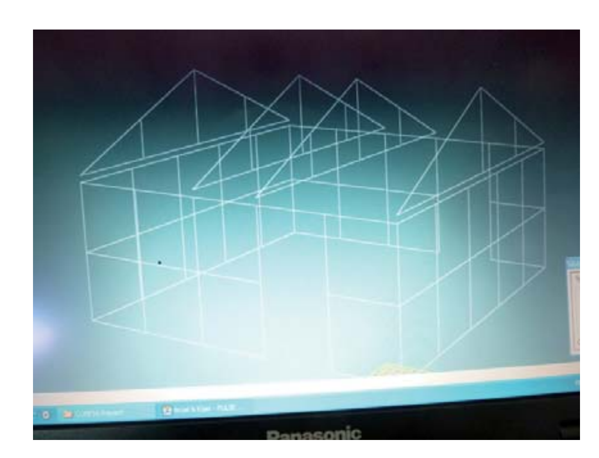












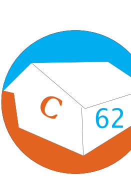
Instrumentation de la maison et analyse modale

2. Essais

Les essais se sont déroulés tel que décrit dans la procédure : bruit blanc - analyse modale - essai sismique - bruit blanc - analyse modale - essai...

Pour les essais, deux signaux d'entrée ont été utilisés:

- un signal reconstitué (HNN) du tremblement de terre du 12 janvier 2010 en Haïti. Synthèse du signal effectuée par le Centre d'Etude Technique et de l'Equipement (CETE Méditerranée), rattaché à l'université de Nice Sophia Antipolis.
- un signal lointain représentatif du scénario aléa fort, sol B de l'Eurocode 8 (Guadeloupe de subduction).



Le principe arrêté consistait à exciter la maison, après l'analyse modale, à 100%, 200% et 300% du signal d'Haïti, puis, en cas de non endommagement total, utiliser le signal lointain à 100% et 380% pour aller jusqu'à la ruine de la maison afin de tirer un maximum d'informations sur le comportement de la structure.

Les discussions au sein de l'équipe ont pris en compte l'état de la structure après avoir subi un essai et sa corrélation avec une situation réelle. A cet effet, l'analyse modale effectuée après chaque essai permettait de mesurer, l'endommagement, en ayant l'amortissement, la fréquence propre et la déformée modale. Il était entendu que la maison en situation réelle pourrait subir un tremblement de terre après plusieurs années d'usage et d'altération.

Le signal lointain a été utilisé à 100 puis à 380%, ensuite un bruit blanc et un sinus ont été utilisés allant jusqu'aux limites admissibles de la table vibrante, mettant ainsi fin aux essais sur la maison.

Une procédure identique a été utilisée pour les essais sur le mur éprouvette.

Signal HNN :

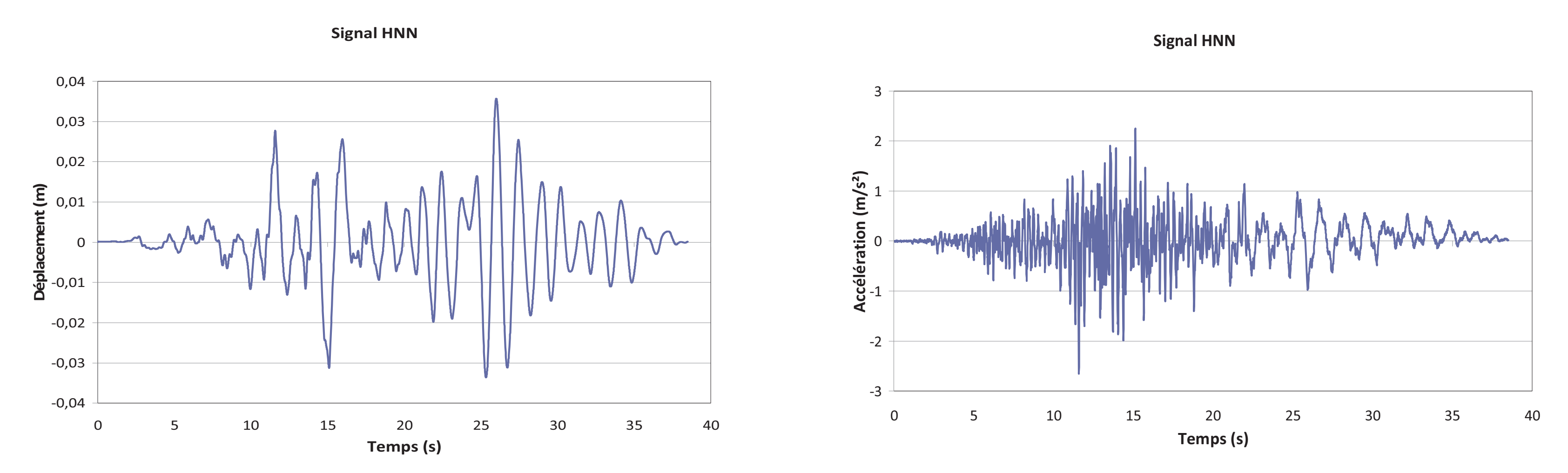
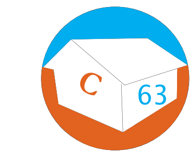


Fig. 4.1 : PGA : 0.27g PGV : 15.8 cm/s – Signal fourni par l'Université Joseph Fourier (Laboratoire 3SR)



Signal Lointain du rapport final du BRGM de l'étude SISBAT : BRGM 1RP-58886-FR:

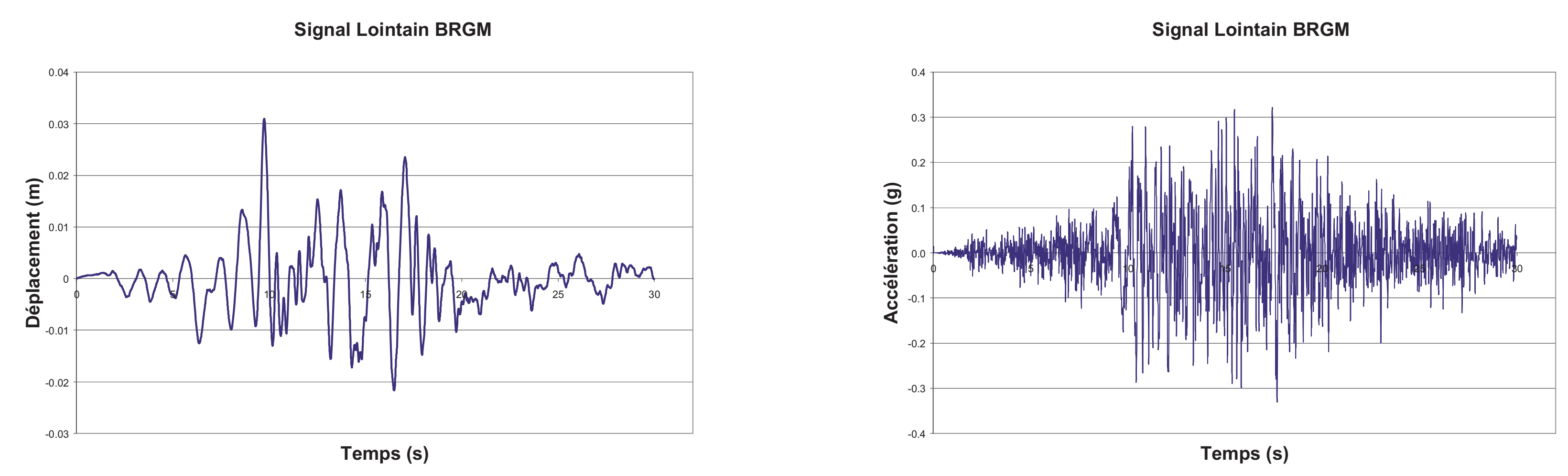
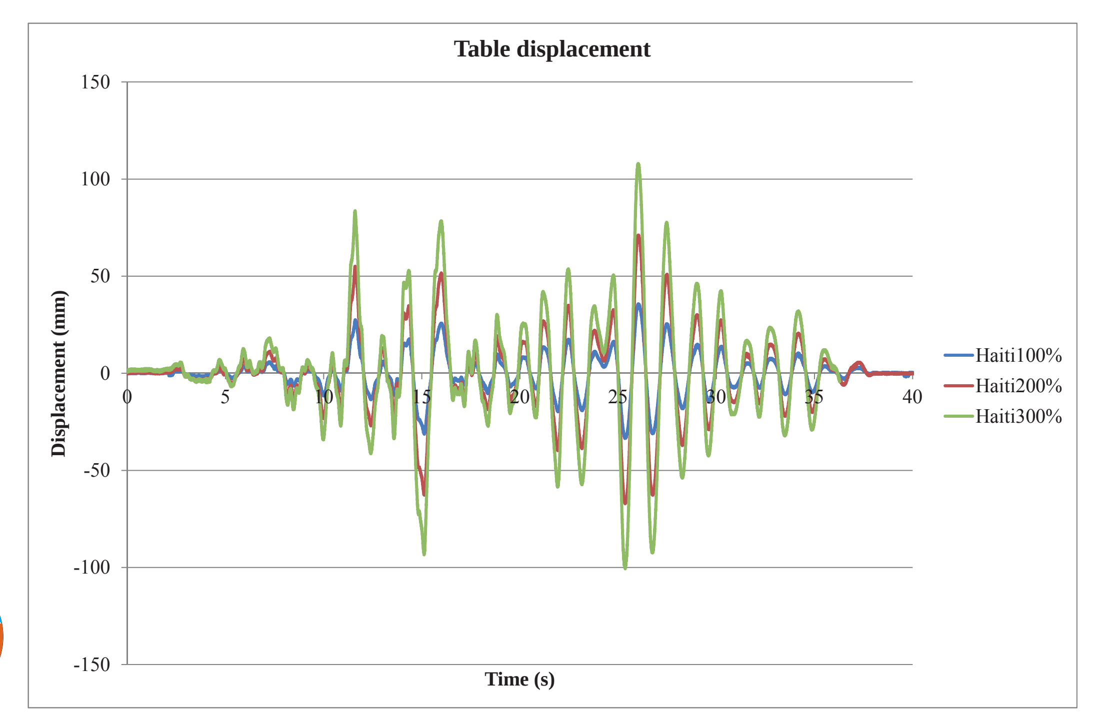
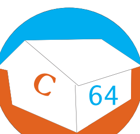


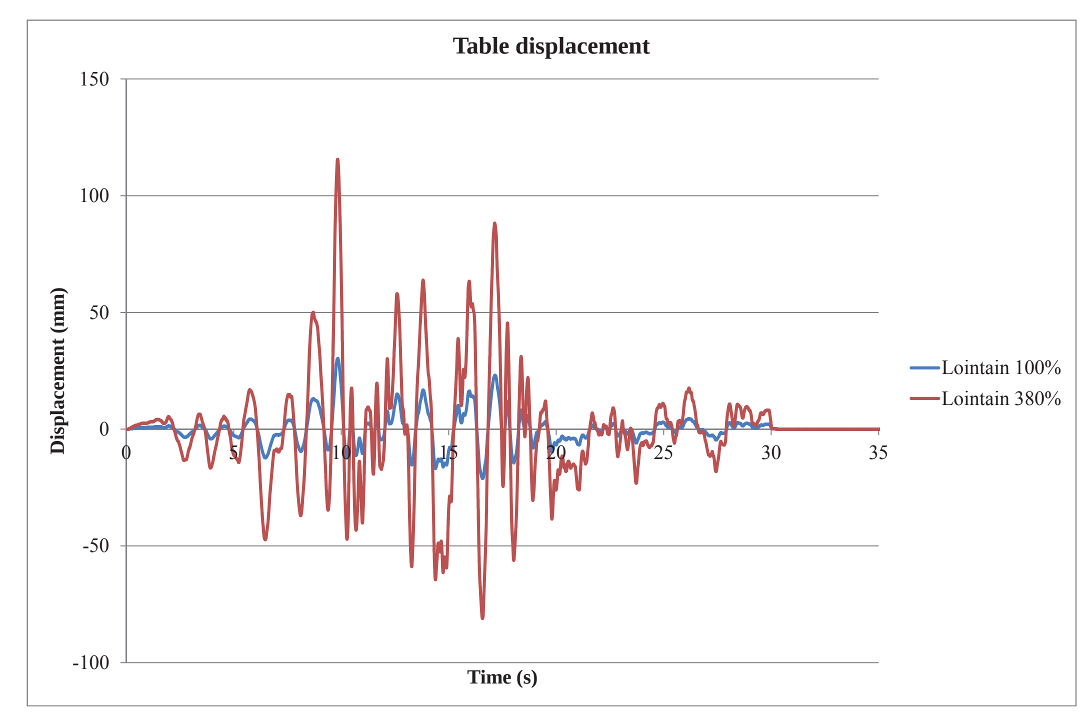
Fig. 4.2 : PGA : 0.33g PGV : 17cm/s Issu du séisme de Miyagi (Japon, 2003), Station : K-Net, calé sur un spectre de séisme avec la relation de Youngs et al. représentatif du scénario aléa fort, sol B de l'Eurocode 8 (Guadeloupe de subduction).







Essais et Déplacements de la table vibrante



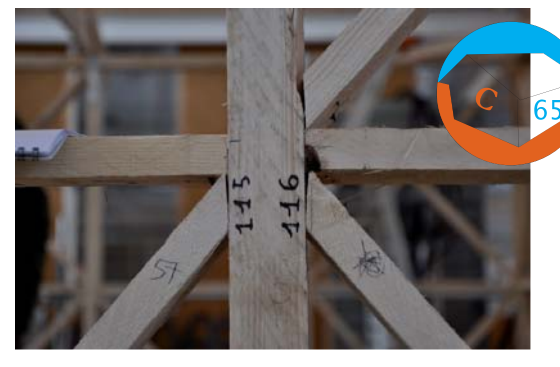




Pour l’observation des effets des différents essais sur la structure, un relevé photographique systématique a été réalisé sur l’ensemble des connexions et noeuds avant et après chacun des essais. Ce qui rendait possible une analyse comparative.













Essai Haïti 100 %

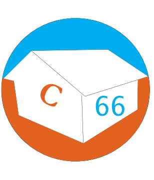
0,27 g

Observations visuelles:

L'observation de la maison au moment de l'essai et après, ainsi que les photos prises n'ont revelé aucun dommage visible causé ni à la structure ni au remplissage.

La maison a donc bien tenu à un tremblement de terre équivalent à celui de 2010.











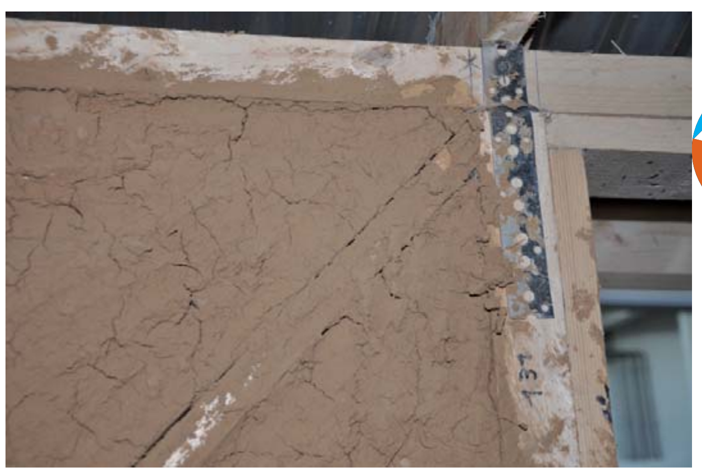
Essai Haïti 200 %
0,54 g

Observations visuelles:

Apparition de quelques fissures légères et décollement du mortier dans certains angles.

Très bonne tenue de la structure face au signal HNN à 200%.













Essai Haïti 300 %

0,81 g

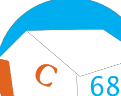
Observations visuelles:

Chute de quelques pierres de remplissage dans les murs perpendiculaires à l'axe de traction - poussée du vérin hydraulique.

Eclats de mortier arrachés avec la chute de pierres.

Arrachement d'un des bras des croix de St André servant de contreventement des fermes.

Amorce de déclouage des poinçons.



Au terme des passages du signal HNN amplifié à 200 % et 300 % constat est dressé: il fait montre du comportement général de la structure qui affiche une bonne résistance de la maison au séisme. L'objectif qui est de protéger les vies est parfaitement atteint au vu de la nature des dégâts minimes constatés à cette intensité du signal qui par ailleurs est supérieure à celle du séisme de Port au Prince de janvier 2010.









Essai Guadeloupe 100 %
0,33 g

Les essais avec le signal lointain ont eu lieu à la suite de ceux effectués avec le signal HNN.
Toutefois, le soin a été pris de refixer correctement les croix de St André avant de poursuivre.

Observations visuelles:

A 100 % du séisme lointain, aucun dégât n'a été observé témoignant là encore de la bonne tenue de la structure.











Essai Guadeloupe 380 %

1,25 g

Observations visuelles:





A ce niveau d'intensité, trois triangles (3/4 de cellule) se sont vidés de leurs pierres de remplissage maçonnées. Sont également apparus quelques trous au niveau du croisement des contreventements de panneaux de murs.



La ductilité du feuillard et son rôle sont visibles, car celui-ci est courbe aux différents noeuds et sort de son champ (plaqué sur le bois par clouage).

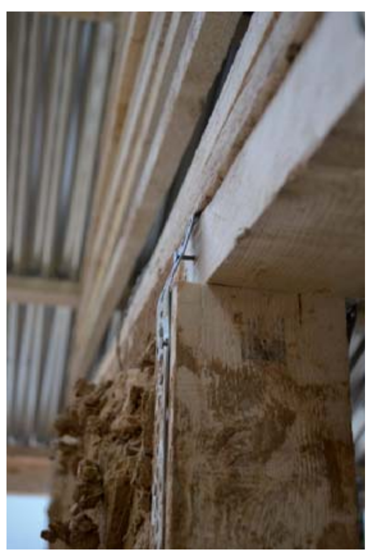
De nombreux clous sont visibles. La combinaison de la ductilité des clous et du feuillard montrent l'efficacité de ce système. Toutefois, il apparaît un début de sortie du bois dû à un début d'arrachement des clous.





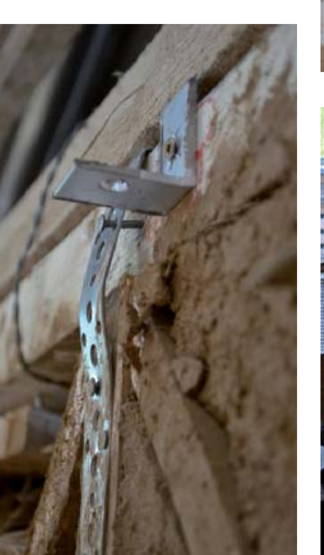
De nombreusx décollement de la maçonnerie sont apparus au niveau de la connexion des bois.















Signal Sinusoïdal

Le signal lointain (Guadeloupe) n'ayant pas entraîné la ruine complète de la maison, un signal sinusoïdal a été joué sur la table vibrante pour pouvoir causer l'endommagement; en vain. Compte tenu de la grande accélération impulsée d'une part et de la masse de la maison d'autre part, le seuil de sécurité de fonctionnement de la table vibrante a été atteint et a ainsi arrêté le système hydraulique.

Observations visuelles:

Pendant le laps de temps au cours duquel la table a fonctionné l'endommagement a concerné la maçonnerie et l'ossature bois:

- chutes de pierres dans quelques triangles de plus,
- décollements du mortier le long des bois,
- fractures des lisses hautes perpendiculaires à l'axe de traction- poussée du verrin hydraulique,
- début d'arrachement des renforts d'angle,
- arrachement d'un des bois des croix de St André,
- ...









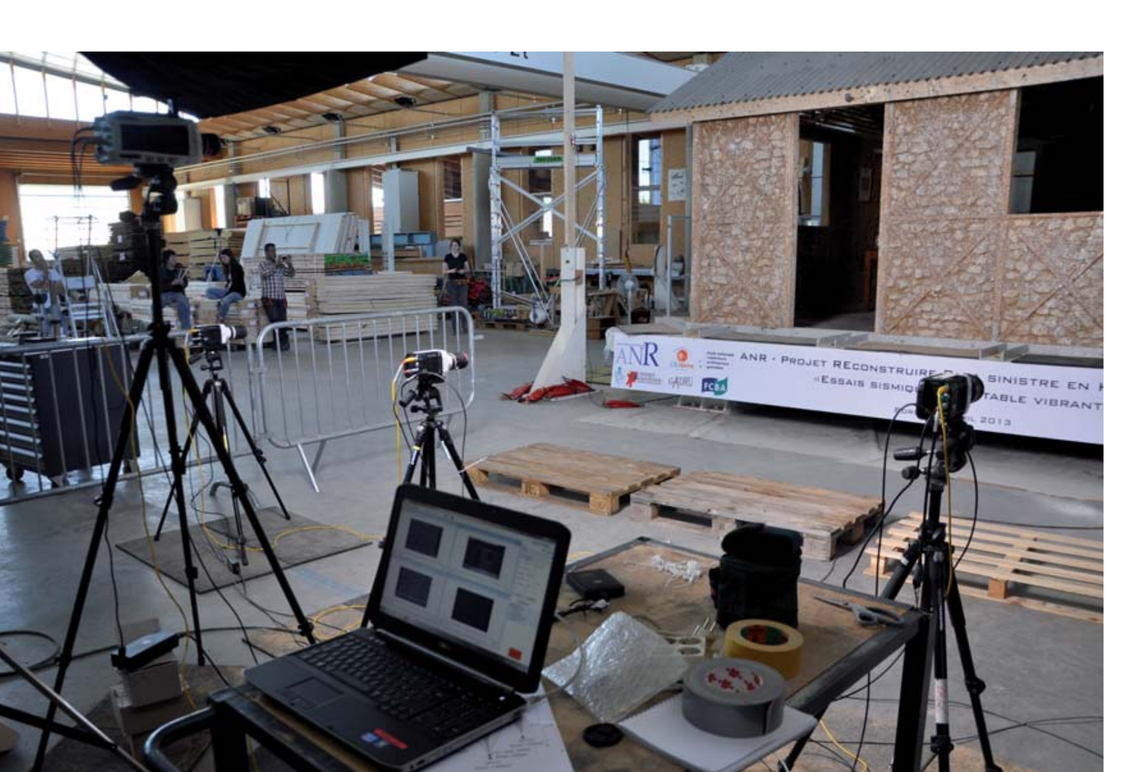


Corrélation d'images

«La corrélation d'images numériques (Digital Image correlation ou DIC en anglais) est une méthode optique 2D ou 3D qui permet de mesurer les déplacements entre deux images. Elle est de plus en plus employée en sciences des matériaux pour déterminer des champs de déformations ou pour fournir des champs de déplacements à des procédures d'identification de propriétés de matériaux.»

Réf. cf: http://fr.wikipedia.org

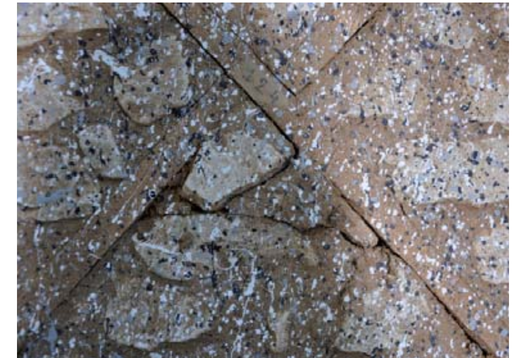
L'acquisition des images pour les travaux de corrélation a été effectuée à l'aide de quatre caméras rapides à très hautes fréquences. Les essais étaient également le prétexte pour d'autres voies de la recherche pour continuer à caractériser ce type de structures.







Réalisation du mouchetis qui sert de repère lors de la capture des images





Rendu du mouchetis sur le mur

Essais sur mur éprouvette

Dans le processus d'analyse multi-échelles, le pan de mur construit a également subi la procédure précédemment décrite des essais. Ci-dessous, les résultats.

10.2. ESSAIS SISMIQUES - MUR



Université Joseph Fourier – Projet REPARH
Bordeaux, le : 11.10.2013
Rapport d'essais N° 403/13/604

Essai	Signal	Niveau	Observation
1	Bruit blanc	1.0 mm RMS x 1/f²	---
2	HNN	100%	Aucun dommage visible
3	Bruit blanc	1.0 mm RMS x 1/f²	---
4	HNN	200%	Aucun dommage visible
5	Bruit blanc	1.0 mm RMS x 1/f²	---
6	HNN	300%	Aucun dommage visible
7	Bruit blanc	1.0 mm RMS x 1/f²	---
8	Lointain	100%	Aucun dommage visible
9	Bruit blanc	1.0 mm RMS x 1/f²	---
10	Lointain	380%	Aucun dommage visible
11	Bruit blanc	1.0 mm RMS x 1/f²	---
12	Aléatoire plat	10 mm RMS x 1/f² bande 2-5Hz	Aucun dommage visible
13	Bruit blanc	1.0 mm RMS x 1/f²	---
14	Aléatoire plat	20 mm RMS x 1/f² bande 2-5Hz	Décollement du mortier & chutes de pierres
15	Bruit blanc	1.0 mm RMS x 1/f²	---







Les résultats des données acquises lors des essais et analysées par le laboratoire de mécanique du FCBA sont les suivants:

11. RÉSULTATS DES ESSAIS SISMIQUES – BRUITS BLANCS

Une analyse de l'endommagement de la maison a été effectuée en traçant les fonctions de réponse en fréquence (FRF) entre les réponses à l'accéléromètre N°7 et à la table (N°10) aux bruits blancs effectués entre chaque niveau de sollicitation sismique.

La FRF est la représentation fréquentielle du rapport entre l'accélération au faîtage sur l'accélération de la table. L'algorithme d'estimation de FRF utilisé dans tous les traitements est le H1, soit

$H_1(f) = \frac{G_{XY}(f)}{G_{XX}(f)}$ avec $G_{XY}(f)$ interspectre de X et Y; $G_{XX}(f)$ autospectre de X

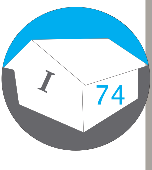
Cette représentation graphique permet de visualiser l'évolution du comportement des structures. Sur ces courbes, les observations suivantes sont faites :

Au fur et à mesure des essais:

- l'amplitude diminue,
- la fréquence propre diminue,
- l'amortissement à la fréquence propre augmente.



Université Joseph Fourier – Projet REPARH
Bordeaux, le : 11.10.2013
Rapport d'essais N° 403/13/604



Ils confirment l'observation et l'analyse visuelle qui ont eu lieu après chaque essai. Au terme des 30 séquences de bruit blanc à faible intensité qui ont servi à l'analyse modale et des 15 étapes alternant signaux sismiques et bruits blancs, la maison est restée debout.

La limite des essais concerne l'ancrage de la maison et la non possibilité de tester la liaison lisse basse et soubassement, seul élément non conforme au contexte réel de construction sur le terrain. Toutefois, le compromis du bâti métallique d'ancrage a permis de contourner cette contrainte liée aux limites d'utilisation de la table vibrante et de réaliser une bonne campagne d'acquisition des données.

L'objectif premier qui est de préserver des vies a été allègrement atteint et vient conforter les choix techniques qui prévalent sur la construction de plusieurs centaines de maisons sur le terrain. Cette bonne tenue aux essais est due à une réalisation de qualité, attentive aux principes constructifs à respecter :

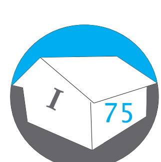
- assurer la réalisation de l'ancrage des poteaux via les feuillards pour une bonne transmission des efforts,
- assurer la liaison soubassement-lisse basse pour une transmission des efforts au sol,
- assurer une bonne stabilité des remplissages (appareillage des pierres, fibres et terre argilo-sableuse, clous dans le bois) pour en éviter ou atténuer la chute,
- assurer la continuité du contreventement de la structure (favoriser le contreventement dans les angles) de manière à transférer les efforts dans le sol.
- respecter la taille et la position des clous pour ne pas favoriser l'éclatement du bois ou le cisaillement du feuillard,
- laisser plusieurs degrés de liberté aux feuillards dans la manière de le clouer afin de garder une flexibilité à l'assemblage,
- respecter la longueur des renforts d'angle qui rigidifient la «boîte» ossature,
- contreventer les fermes et liaisonner entre eux les éléments des croix de St André pour éviter qu'elles ne sortent du plan de sollicitation lorsqu'elles travaillent en compression,
- ...

L'ensemble de ces règles existent sur les fiches techniques mises à disposition des ingénieurs, contremaîtres, maçons et charpentiers haïtiens associés au projet de reconstruction de l'habitat rural mené par la PADED et financé par MISEREOR. Cette approche est de plus en plus utilisée dans de nombreux projets et adoptée par de nombreuses organisations: Entrepreneurs du Monde, VEDEK de la PAPDA, ONU-Habitat,...
Les très bons résultats de ces essais ne peuvent que continuer

de convaincre de la pertinence de la mise en avant des cultures constructives, des ressources locales ainsi que des savoirs et savoir-faire locaux associés pour offrir de vraies perspectives de développement dans l'élan de reconstruction de l'Haïti post séisme.

Dans les perspectives du projet, une prolongation de douze mois a été accordée à l'équipe au titre des bons résultats obtenus faisant de cette démarche et de ReparH un projet phare de l'ANR. Prévu au départ pour 42 mois, de juillet 2010 à janvier 2014, le projet se terminera donc en janvier 2015. Pour atteindre pleinement ses objectifs, des accords avec le milieu universitaire et scientifique haïtien sont en cours de finalisation; le transfert des compétences scienfiques et la collaboration avec des homologues haïtiens étant un des axes forts du projet. De même, les essais à Bordeaux ont mené à maturation une démarche et un désir d'équipement à moindre échelle: la construction d'une table vibrante pour renforcer le pôle «risques majeurs» aux Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau.

Ce projet ouvre la voie à de nombreuses collaborations futures de recherche-action entre les différents partenaires ayant collaborés ici. Il a rendu possible la rencontre de mondes qui ne se cotoient guère en temps normal: le monde rural et ses cultures constructives, les matériaux locaux, la recherche scientique parasismique, l'architecture, l'ethnologie, la formation professionnelle non conventionnelle, l'entreprenariat, l'habitat du plus grand nombre,... Il a permis d'aller au delà de ses objectifs tant les liens ont été riches et variés et aboutissent à des synergies inovantes dans un champ d'application qui ne reste que peu exploré.






















Carnet de chantier par Juan TRABANINO

FONDATIONS TABLE VIBRANTE
03.04.13
JOINT DE RÉSONNANCE
DALLE BA TABLE
DALLE BA BATIMENT
-2M
SOL FERME
PIEUX
SOL MARÉCAGEUX
-22M
BON SOL (MARNE)
PB DE RÉSONNANCE DÛ AUX CLOUS QUI SONT RESTÉS... (HISTOIRE CLOUAGE POLYSTIRÈNE...)
LE CLOU
EL CLAVO

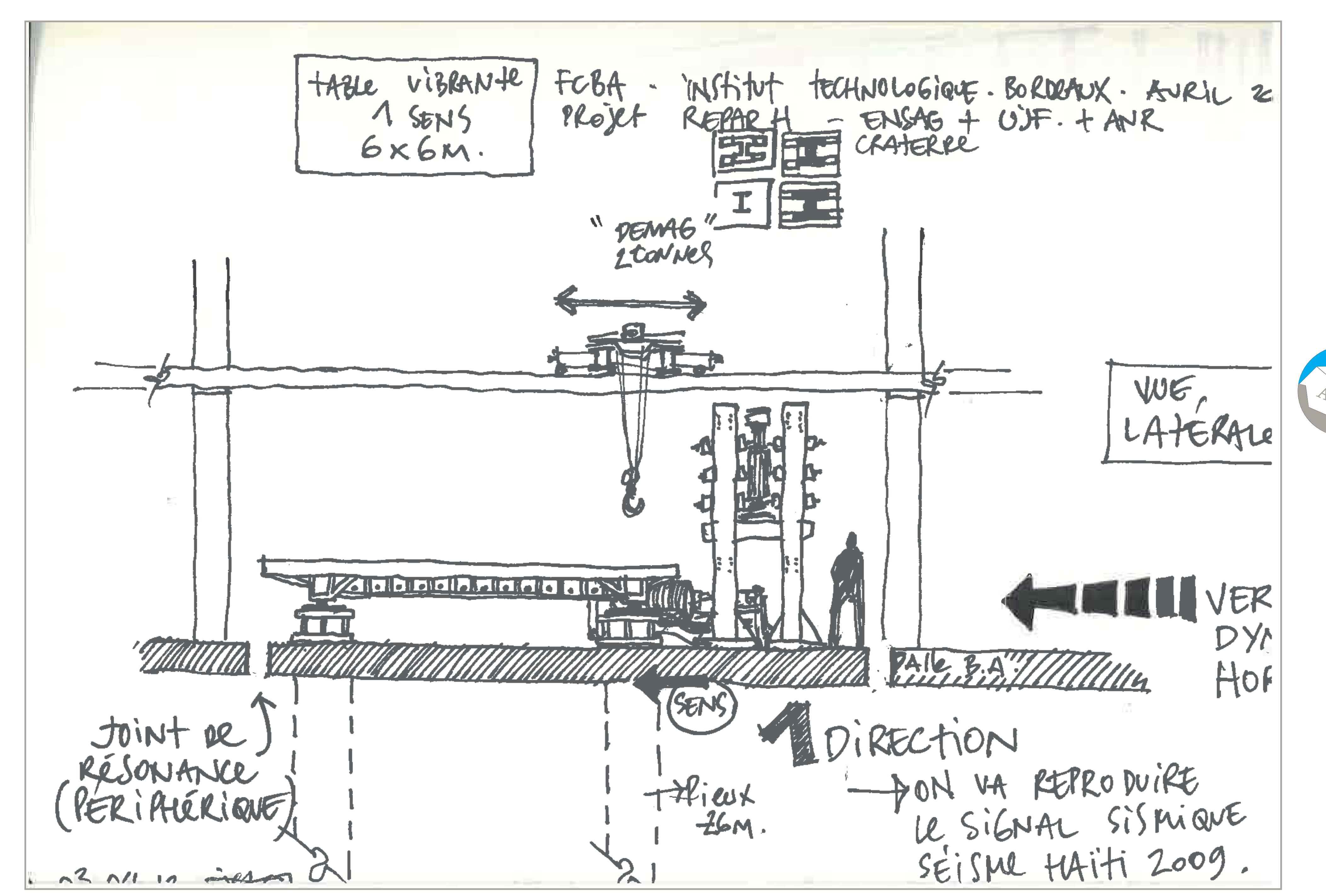
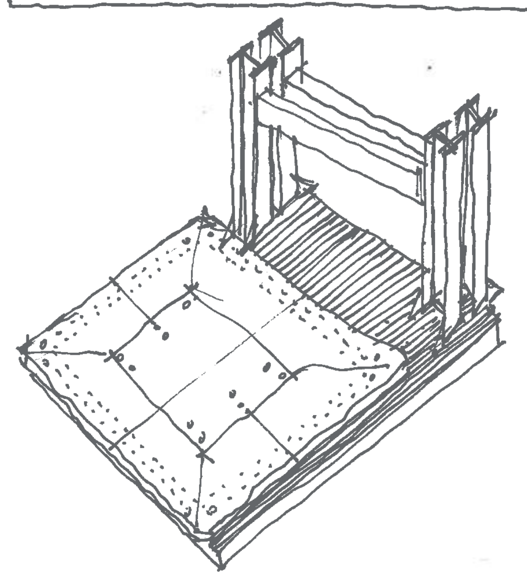

TABLE VIBRANTE
1 SENS
6 x 6 M.
FCBA · INSTITUT TECHNOLOGIQUE · BORDEAUX · AVRIL
PROJET REPAR H - ENSAG + UJF. + ANR
CRATERRE
"DEMAG"
2 TONNES
VUE LATÉRALE
DALLE B.A.
SENS
1 DIRECTION
→ ON VA REPRODUIRE LE SIGNAL SISMIQUE SÉISME HAITI 2009.
JOINT DE RÉSONANCE (PÉRIPHÉRIQUE)
PIEUX 26 M.

TABLE VIBRANTE UNI AXIALE



- PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES

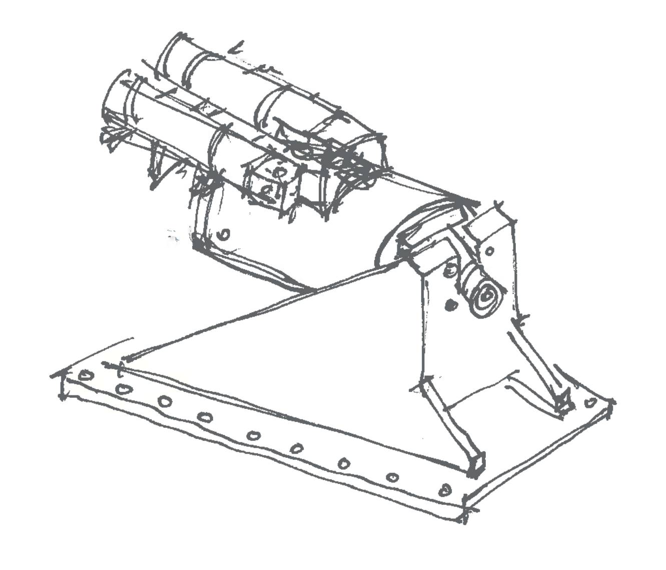
NOYAU CENTRAL :
- DIMENSIONS = 3m x 3m
- MATIÈRE : ALUMINIUM
- POIDS : 2 TONNES

AVEC EXTENSIONS :
- DIM = 6M x 6M
- POIDS = 4 t

DÉPLACEMENT MAX ± 125 mm
VITESSE MAX 0.75 m/s
ACCÉLÉRATION MAX ≃ 8g TABLE NUE SANS EXTENS°
≃ 4g AVEC
GAMME DE FRÉQUENCES JUSQU'À 30 HERTZ
CHARGE UTILE 10 t/m

030413

MODÈLE : PALIER HYDROSTATIQUE (CONSTRUCTION SUR PLAN)
CAPACITÉ : 250 KN
COURSE : 250 mm
CONTRÔLEUR : MTS - FLEX TEST IIM
(PILOTAGE DÉPLACEMENT + COMPENSATEUR)
GROUPES HYDRAULIQUES : MTS SILENT FLOW 400L/min
ACCUMULATEUR : PRESSION 4L VÉRIN - 20L EN LIGNE
RETOUR 4L VÉRIN - 4L EN LIGNE
SERVO VALVE : 2 x 230 L/min (2 ÉTAGES)



030413



DEMAG 2t

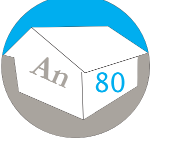
MTS

JOINT DE RÉSONNANCE (PÉRIPHÉRIQUE À LA TABLE).

VUE DE FACE

FONDATIONS SUR PIEUX - 26m.

03.04.13



MARQUE : INA

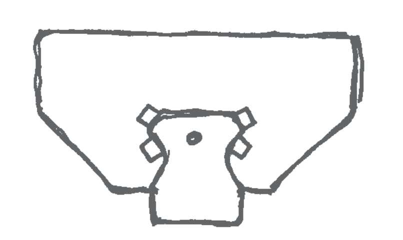
PRINCIPE : CHARIOT À ROULEAUX

RÉFÉRENCES : RWU45 / RWU35

COEFF. FROTTEMENT : 0.001

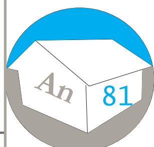
Vitesse MAX : 3.5 m/s

ACCÉLÉRATION MAX : 10g



030413

les Pierres...
120413



SENS DU CONTREVENTEMENT :

Reprise des charges

Descente de charge aux Potelets/Poteaux.

? TROP CONTREVENTÉ, TROP RIGIDE ?
POSITIONNEMENT DES CROIX DE ST ANDRÉ →
ET SI ÇA REPOSAIT SUR LA LISSE BASSE = EFFORT TRANSMIS À LA TERRE ? PLUS RÉSISTANT ? OU PLUS RIGIDE ?

PEUT-ON ENLEVER DU CONTREVENTEMENT ? = MOINS DE CROIX ? YANNICK : NON ; OSSATURE IDÉALE (Y.)

10.04.13

MUR ÉPROUVETTE

Lisse Haute

POTEAU

Potelet

Croix de St ANDRÉ

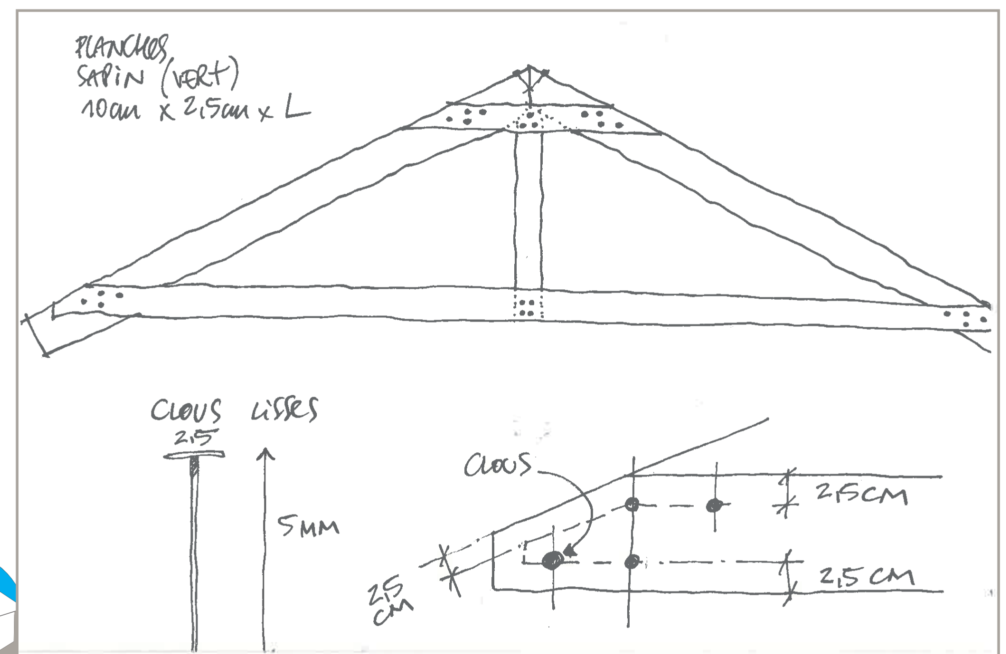
Lisse Basse

RAIL

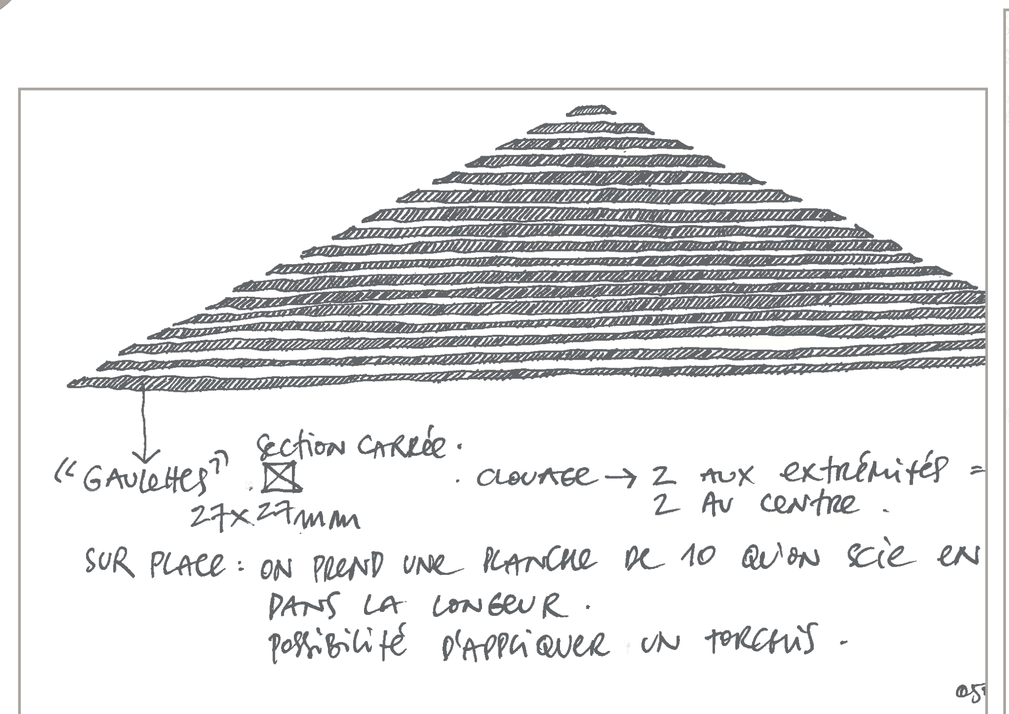
10/45

85 85 85 85

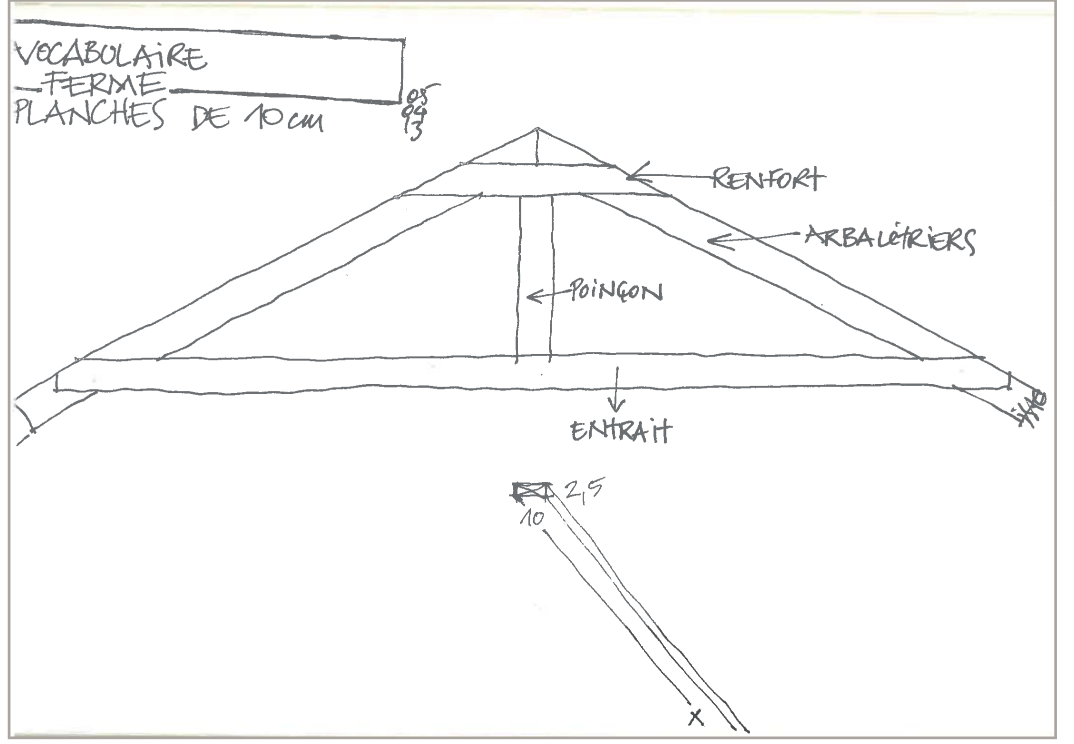
5/10 2,5/10 2,5 2,5 5x10



PLANCHES
SAPIN (VERT)
10cm x 2,5cm x L
CLOUS
2,5
LISSES
5MM
CLOUS
2,5CM
2,5 CM
2,5 CM



« GAULETTES »
Section carrée.
27x27mm
CLOUAGE → 2 aux extrémités
2 au centre.
SUR PLACE : ON PREND UNE PLANCHE DE 10 QU'ON SCIE EN
DANS LA LONGUEUR.
POSSIBILITÉ D'APPLIQUER UN TORCHIS.



VOCABULAIRE
FERME
PLANCHES DE 10 cm
RENFORT
ARBALÉTRIERS
POINÇON
ENTRAIT
2,5
10

4 clous
3x70mm

idem

1 clou
3 x 70mm

2 clous
2,5 x 50mm
(en sous face)

les clous sont lisses

DONC

10 clous de 70mm x 3
2 clous de 50mm x 2,5
PAR FEUILLÈRE.

040313

Présentat° Vieux-Champagne. Atelier UJF

050413.

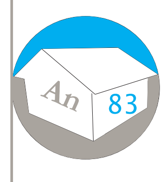
F = FORCE = MASSE x ACCÉLÉRATION = m x α
effets
= 1 Kilo x 1 G

⚠ L'ANCRAGE AU SOL PERMET QUE LE BÂT RESTE ANCRÉ ET DISSIPE AINSI L'EFFORT AILLEURS.

- SI LE BÂT NE DISSIPE PAS, IL FAUDRAIT FAIRE "UN CORPS RIGIDE", UN BUNKER
- CAPACITÉ À DISSIPER :

$$F = \frac{m \times \alpha}{q}$$

q tjrs sup à 1.
q = dissipat°



MUR ÉPROUVETTE
080413

DÉCO
CACHE JOINT
EN OPTION

LAMBREQ

45° à la 1/2
d'la planche

080413

Flo
style.

Cécila
style.

160413

il Presidente style

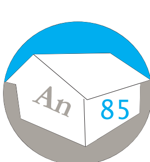
Pierres de merde!
Yannic style

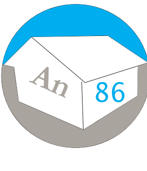
160413

Fabrizio style

Juan style

160413





c'est CHIANT oui !

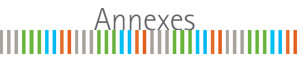
Yannick

Cécilia

Cécilia.
100403

TAHER
100413

NORO



Cécilia
100413

Remplissage
mur
éprouvette
100413

Fred.

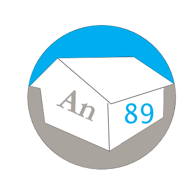
Ya

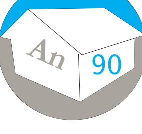


Fred

FRED.

sur épaulette.





CLOUAGE DE LA TôLE.

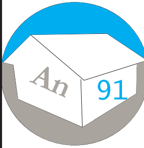
EL PRESIDENTE & Flo.

échafaudage

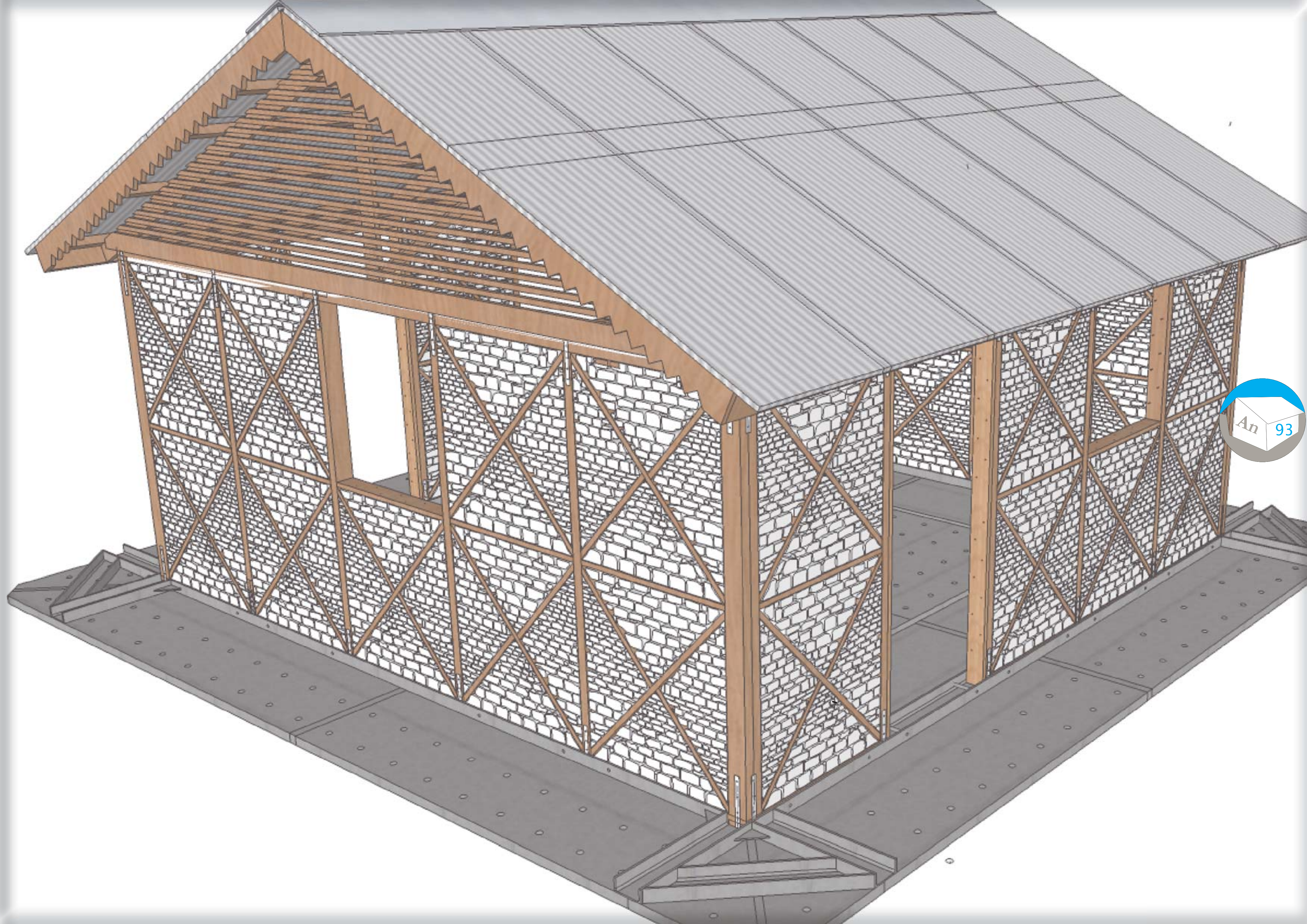
il Présidente.

M. Bogli

100413




Agence Nationale de la Recherche
ANR
ENSAG
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE GRENOBLE
CRAterre
GRENOBLE 1
UNIVERSITE JOSEPH FOURIER
SCIENCES.TECHNOLOGIE.SANTÉ
An
92
GADRU
FCBA
LABEX AE&CC
Université Nice Sophia Antipolis
CETE
Méditerranée


An
93